

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Filip Girszewski

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Kompenzace zemních spojení ve VN sítích
Earth fault compensation in MV network

Zadání bakalářské práce

Student: **Filip Girszewski**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Kompenzace zemních spojení ve vn sítích.**
Earth fault compensation in MV network.

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popis kabelových i venkovních sítí nn a vn.
2. Teoretický rozbor vzniku zemního spojení.
3. Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů.
4. Možnosti lokalizace místa zemního spojení.
5. Příklad výpočtu.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
2. Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
3. Trojánek, Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL 1987
4. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
5. Toman, P.: Lokalizace místa zemního spojení v sítích VN, Brno, 2002

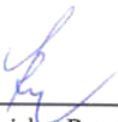
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020





prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Lomnici dne 10. 4. 2020


.....
Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych touto cestou poděkovat panu doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za cenné rady, připomínky a vedení mojí bakalářské práce.

Moje poděkování patří i společnosti E.ON Distribuce, a.s., která mi umožnila studovat a vytvořit tuto práci při současném zaměstnání. Zejména děkuji Ing. Radku Večeřovi.

Prohlášení zástupce spolupracující právnické osoby

„Souhlasím se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských programech VŠB-TU Ostrava.“

Za E.ON Distribuce, a. s.:

V Českých Budějovicích dne 10. 4. 2020

.....
Ing. Karel Mencl
Vedoucí Správy a Provozu sítě VN, NN a ZP

Abstrakt

V této práci popisují základy problematiky zemních spojení ve trojfázových VN sítích určených k distribuci elektrické energie, zejména na hladině 22kV. Zabývám se popisem parametrů vedení, které jsou základním stavebním kamenem pro pochopení tématu. Jsou zde rozebrány druhy kabelových a venkovních vedení napříč napětovými hladinami. V návaznosti na tento teoretický základ je zde popsán základní princip různých způsobů provozování sítí s ohledem na provedení uzlu a uzemnění neživých částí sítě. Dále pak teoretický vznik zemního spojení v síti a ve kterých sítích se zemní spojení vyskytuje. Dle způsobu provedení uzlu izolované sítě jsou zde znázorněny jednotlivé stavy, které nastávají při zemních spojeních. Mimo teoretické poznatky jsou v práci uvedeny také fázorové diagramy zobrazující příslušné jevy. Zemní spojení je samo o sobě dosti zajímavý pojem. Tento pojem v sobě ovšem slučuje rozsáhlou problematiku fyzikálního, energetického a bezpečnostního charakteru, kterou je nutno chápat komplexně. V další části této práce se zabývám lokalizací místa zemního spojení v elektrické síti. V rámci tvorby této práce jsem provedl analýzu vývoje kapacitních proudů v distribuční soustavě E.ON Distribuce, a.s. Výstupem této analýzy je graf zobrazující trend vývoje kapacitních proudů. V poslední kapitole se zabývám výpočtem charakteristických veličin zemního spojení navržené sítě IT s uzlem uzemněným přes kompenzační tlumivku. Na tuto síť navrhuji vhodnou tlumivku. Hlavním úkolem a cílem této práce je shrnutí teoretických a praktických poznatků nutných k pochopení zemního spojení, způsobu jeho kompenzace a možnosti jeho přesného místního dohledání. Pro tvorbu ilustračních schémat byl použit licencovaný program AutoCAD.

Klíčová slova

Parametry vedení, zemní spojení, kompenzovaná síť VN, kompenzace, kapacitní proud, tlumivka, lokalizace.

Abstract

The aim of this paper is to describe the topic of earth fault in three phase MV network which is used to distribute electrical energy, especially at the level of 22 kV. I focus on the description of transmission parameters, which are essential for understanding the topic of this paper. I look at the description of different kinds of cable and outside transmission throughout the voltage levels. In connection to the theoretical foundation, I describe the main principles of the different ways of maintaining network, with consideration of the formation of nodes and earthing of the network's inanimate parts. Following with the description of theoretical formation of earth fault in network and in which networks earth fault could be found. Each state which happens during earth fault is characterized according to the formation of the node in the isolated network. Except for the theoretical aspects, I also include phasor diagrams which are depicting relevant aspects. Earth fault is already an interesting term itself. Furthermore this topic includes the vast problematics of the physical, energetic and safety character, which is why this topic needs to be looked at comprehensively. In the next part of this paper, I will be discussing the basic description of localization of earth fault in network. As a part of my paper, I have conducted an analysis of the development of capacitive currents in the distribution system E.ON Distribuce, a.s. The result of this analysis is a graph showing the trend of development of capacitive currents. In the last chapter I focus on the calculation of characteristic values of earth fault in designed IT network with earthed node through compensation reactor. I propose a suitable compensation reactor for this network. The main aim of this paper is to summarize the theoretical and practical knowledge in order to understand earth fault the way of its compensation and the possibility of its exact localization. To create the illustration schemes I have used the licensed program AutoCAD.

Key words

Transmission parameters, earth fault, compensated MV network, compensation, capacitive current, compensate reactor, localization.

Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek.....	12
Zkratky a symboly.....	12
Úvod	14
1. Popis střídavých kabelových a venkovních sítí.....	15
1.1. Parametry vedení.....	15
1.2. Základní členění sítí dle napěťové hladiny	17
1.3. Elektrická vedení.....	18
1.4. Uzel sítě.....	20
1.5. Rozdělení sítí dle provedení uzlu sítě a uzemnění neživých částí sítě.....	21
1.5.1. Síť IT	21
1.5.2. Síť TT	22
1.5.3. Síť TN-C.....	22
1.5.4. Síť TN-S	23
1.5.5. Síť TN-C-S	23
2. Teoretický rozbor zemního spojení a možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů ..	24
2.1. Zemní spojení.....	24
2.1.1. Druhy zemních spojení.....	25
2.1.1.1. Kovové zemní spojení	25
2.1.1.2. Obloukové zemní spojení.....	25
2.1.1.3. Odporové zemní spojení.....	25
2.2. Kapacitní proudy	26
2.2.1. Kompenzace zemních kapacitních proudů	27
2.3. Rozdělení izolovaných sítí dle způsobu provedení uzlu	27
2.3.1. Síť s izolovaným uzlem.....	27
2.3.1.1. Dokonalé trvalé zemní spojení v kapacitně symetrické izolované síti.....	28
2.3.2. Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku	29
2.3.2.1. Zhášecí tlumivka	30
2.3.2.2. Rezonanční křivka zhášecí tlumivky	31
2.3.3. Síť s uzlem uzemněným přes rezistor.....	32
2.4. Tepelné účinky elektrického oblouku při zemním spojení	33
2.5. Vlastní podstata kompenzace zemních kapacitních proudů.....	34
2.5.1. Účinky elektrického oblouku na zařízení sítě	34
2.5.2. Zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví osob a zvířat	34
3. Možnosti lokalizace a vymezení místa zemního spojení	36
3.1. Zjištění postiženého vývodu	37
3.1.1. Měření netočivé složky proudu a napětí.....	37

3.1.2.	Švédská neutrála	38
3.1.2.1.	Provoz se zemním spojením metodou švédské neutrály	39
3.1.2.2.	Určení místa zemního spojení metodou švédské neutrály	39
3.1.3.	Měření jalových nebo činných „nulových“ výkonů	39
3.2.	Identifikace konkrétního úseku a místa zemního spojení	40
3.2.1.	Metoda měření směru toku netočivé složky proudu	40
3.2.2.	Metoda vymezení úseku zemního spojení pomocí manipulací	40
3.2.3.	Indikace postižených úseků kabelů VN	40
3.2.4.	Metody přesného místního dohledávání zemního spojení pomocí ručních přístrojů	41
4.	Příklad výpočtu kompenzace zemního spojení.....	42
4.1.	Teoretický rozbor	42
4.2.	Uvažované parametry	42
4.3.	Výpočet	43
4.4.	Návrh kompenzační tlumivky	45
4.4.1.	Indukčnost kompenzační tlumivky	45
4.4.2.	Jalový výkon kompenzační tlumivky	45
4.4.3.	Návrh výkonu kompenzační tlumivky	45
Závěr.....		46
Zdroje		47
Přílohy		48

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Trojúhelník impedance	15
Obrázek 2 - Trojúhelník admitance	16
Obrázek 3 - Náhradní schéma vedení.....	17
Obrázek 4 – Zjednodušené náhradní schéma vedení po zanedbání příčných parametrů vedení	17
Obrázek 5 - Příklady holého venkovního vedení [16]	19
Obrázek 6 - Příklad řezu podzemním kabelem 22- AXEKVCEY [15]	19
Obrázek 7 – Vinutí transformátoru zapojené do hvězdy	20
Obrázek 8 – Zapojení transformátoru Dyn1	20
Obrázek 9 – Schéma sítě IT	21
Obrázek 10 – Schéma sítě TT	22
Obrázek 11 - Schéma sítě TN-C.....	22
Obrázek 12 – Schéma sítě TN-S	23
Obrázek 13 - Schéma sítě TN C-S	23
Obrázek 14 - Zemní spojení v kapacitně souměrné izolované síti	24
Obrázek 15 – Nárůst kapacitního proudu v DS 22 kV E.ON Distribuce, a.s. v letech 2002 – 2020	26
Obrázek 16 – Trojfázová síť s izolovaným uzlem	27
Obrázek 17 – Zemní spojení v souměrné izolované síti	28
Obrázek 18 – Fázorový diagram pro stav sítě dle obr. 17.....	28
Obrázek 19 – Princip funkce kompenzace zemního spojení na L3 pomocí kompenzační tlumivky	29
Obrázek 20 – Fázorový diagram pro stav sítě viz obr. 19.....	29
Obrázek 21 - Zhášecí tlumivka s automatikou připínání odporu k výkonovému vinutí [13]	30
Obrázek 22 - Rezonanční křivka	31
Obrázek 23 - Síť s uzlem uzemněným přes rezistor.....	32
Obrázek 24 - Fázorový diagram pro stav sítě viz obr. 23	32
Obrázek 25 - Průchod proudu přes konzoli do těla betonového sloupu [14]	33
Obrázek 26 - Termovizní snímek průchodu proudu přes konzoli do těla betonového sloupu [14]	33
Obrázek 27 – Zapojení měření netočivé složky proudu a napětí v napájecí rozvodně VNN/VN	37
Obrázek 28 – Příklad principu pásem napětí uzlu u švédské neutrály [7]	38
Obrázek 29 – ELVAC ELF7 (Ruční přístroj pro lokalizaci místa zemního spojení) [18].....	41
Obrázek 30 - Pravoúhlé schématické znázornění počítané sítě	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Normalizované napěťové hladiny	18
Tabulka 2 - Jmenovité napěťové hladiny používané v ČR – určení části elektrizační soustavy	18
Tabulka 3 - Přehled konstant jednotlivých typů zemničů [5]	34
Tabulka 4 - Soupis úseků vedení podle způsobu provedení a dle použitého průřezu	43
Tabulka 5 - Tabulka zvoleného rozsahu vedení a vypočtených hodnot parametrů vedení	44
Tabulka 6 - Jmenovité výkonové řady tlumivek – spol. EGE, s.r.o. [20]	45

Zkratky a symboly

AC	[A]	Střídavý proud
B	[S]	Susceptance - imaginární složka admitance
Bc	[S]	Kapacitní susceptance
C	[F]	Kapacita
C ₀	[F]	Kapacita sítě proti zemnímu potenciálu
DC	[A]	Stejnoseměrný proud
D _S	[m]	Vzdálenost vodičů od zrcadlových obrazů
G	[S]	Admitance - vodivost
I	[A]	Elektrický proud
I ₀	[A]	Netočivá složka elektrického proudu
I _C	[A]	Elektrický proud kapacitního charakteru
I _L	[A]	Elektrický proud induktivního charakteru
I _P	[A]	Poruchový proud
I _W	[A]	Svodový proud
L	[H]	Indukčnost
NN	-	Nízké napětí
PNE	-	Podniková norma energetiky
PTN/MTN	-	Přístrojový transformátor napětí
PTP/MTP	-	Přístrojový transformátor proudu

R	[Ω]	Elektrický odpor
RCC	-	Residual Current Compensation - porovnávací proudová kompenzace
R _N	[Ω]	Hodnota odporu uzlového rezistoru
R _P	[Ω]	Přechodový odpor místa zemního spojení
S	[mm ²]	Průřez
SAIDI	-	Průměrná systémová doba přerušení dodávky el. energie
SAIFI	-	Průměrná systémová četnost přerušení dodávky el. energie
S _K	[VA]	Zdánlivý výkon
TS	-	Trafostanice
U	[V]	Elektrické napětí
U ₀	[V]	Uzlové napětí
U _f	[V]	Fázové napětí
U _S	[V]	Sdružené napětí
VN	-	Vysoké napětí
VVN	-	Velmi vysoké napětí
X _C	[Ω]	Kapacitní reaktance
X _L	[Ω]	Induktivní reaktance
\bar{Y}	[S]	Admittance – zdánlivá vodivost
\bar{Z}	[Ω]	Impedance - zdánlivý odpor
\bar{Z}_N	[Ω]	Impedance uzlu sítě
as	[m]	Střední vzdálenost vodičů
j	-	Označení imaginárního čísla (jalové složky)
m	[m]	Střední výška vodičů nad zemí
r	[m]	Poloměr
π	-	Konstanta - Ludolfovo číslo
φ	[°]	Úhel „fí“
ρ	[$\mu\Omega\text{m}$]	Měrný elektrický odpor
ω	[rad · s ⁻¹]	Úhlová frekvence (2 π f)

Úvod

V zájmu zachování kontinuity dodávky elektrické energie z místa výroby k místu spotřeby musí provozovatele elektrických sítí omezit dobu zejména neplánovaných bezproudí – typicky vzniklých poruchovým jevem. Specifické sítě lze v případech poruch typu zemního spojení za určitých podmínek provozovat dále, a to až do doby lokalizace a odstranění jeho příčiny. Doba neplánovaných bezproudí je tedy v těchto případech omezena. Tato problematika do značné míry souvisí s technickým provedením dané sítě, zejména pak s provedením uzlu sítě.

Samotné lokalizaci zemního spojení předchází uvedení sítě do takového stavu, který zajistí v místě zemního spojení minimální (ideálně nulový) zemní proud. I když je možné konkrétní sítě za daných podmínek provozovat se zemním spojením, je nutné tento jev co nejrychleji lokalizovat a odstranit. Efektivní lokalizace pozitivně ovlivňuje dobu a četnost bezproudí, což má pozitivní vliv na ukazatele SAIDI a SAIFI.

1. Popis střídavých kabelových a venkovních sítí

1.1. Parametry vedení

Díky definovaným parametrům vedení vztaženým na jednotku délky jsme schopni vyjádřit základními elektrickými veličinami vlastnosti celých vedení. Rozlišujeme 4 základní parametry vedení – R , X_L , G , B_C [19]:

R Činný odpor (reálná složka impedance)

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \left[\frac{\Omega}{m}; \mu\Omega m; m; mm^2 \right] \quad (1.1)$$

X_L Induktivní reaktance (imaginární složka impedance)

$$X_L = L \cdot \omega \quad [\Omega; H; rad \cdot s^{-1}] \quad (1.2)$$

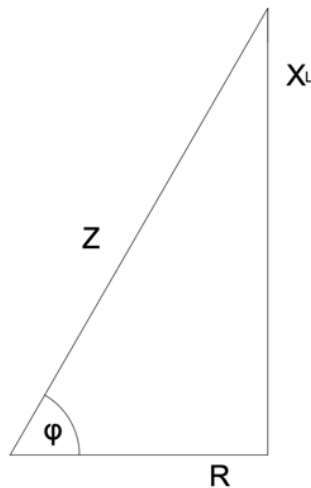
Samotná indukčnost L se vypočítá dle vztahu:

$$L = 0,46 \log\left(\frac{a_s}{r}\right) + 0,05 \left[\frac{mH}{km}; m \right] \quad (1.3)$$

Tyto parametry společně tvoří podélnou impedanci. Jedná se o komplexní veličinu, složenou právě ze dvou zmíněných složek:

$$\bar{Z} = R + jX = |\bar{Z}| \cos \varphi + j|\bar{Z}| \sin \varphi \quad [\Omega; rad/^\circ] \quad (1.4)$$

$$|\bar{Z}| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega] \quad (1.5)$$



Obrázek 1 - Trojúhelník impedance¹

¹ Je uveden trojúhelník impedance s induktivním charakterem

G Svod (reálná složka admitance)

$$G = \frac{1}{R} \quad [S; \Omega] \quad (1.6)$$

B_C Kapacitní susceptance (imaginární složka admitance)

$$^2B_C = C \cdot \omega \quad [S; F; \text{rad} \cdot s^{-1}] \quad (1.7)$$

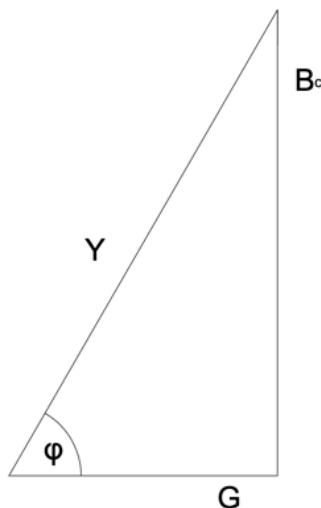
Kapacitu C vypočítáme dle následujícího vztahu:

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{a_s \cdot 2m}{r \cdot D_s}} \quad \left[\frac{mF}{km}; m \right] \quad (1.8)$$

Společně vytvářejí tyto parametry příčnou admitanci (vodivost). Obecně se jedná o převrácené hodnoty impedance:

$$\bar{Y} = G + jB \quad [S] \quad (1.9)$$

$$|\bar{Y}| = \sqrt{G^2 + B^2} \quad [S] \quad (1.10)$$



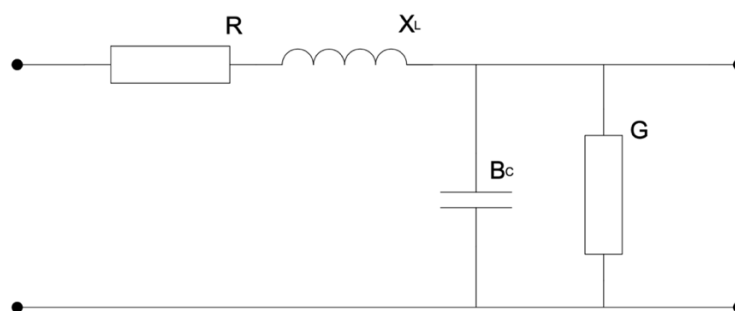
Obrázek 2 - Trojúhelník admitance³

Každé elektrické vedení provozované jako střídavé disponuje všemi zmíněnými parametry. Ovšem pro zjednodušení některých výpočtů je lze zanedbat a uvažovat pouze s podstatnými parametry pro daný výpočet. Sítě NN a VN, nebo-li „krátká vedení“, považujeme za sítě se soustředěnými parametry. U stejnosměrných (DC) sítí tedy uvažujeme pouze s parametrem činného odporu R. U sítí střídavých bereme v úvahu činný odpor R a induktivní reaktanci X_L . Sítě VVN, nebo-li „dlouhá vedení“, považujeme za sítě s rozprostřenými parametry. U těchto sítí respektujeme činný odpor R, induktivní reaktanci X_L a kapacitní susceptanci B_C . U vedení, jejichž jmenovité napětí je 400 kV a větší, pak navíc počítáme s parametrem svodu G. [19]

² B_C lze také vyjádřit jako kapacitní reaktanci (X_C) pomocí její převrácené hodnoty.

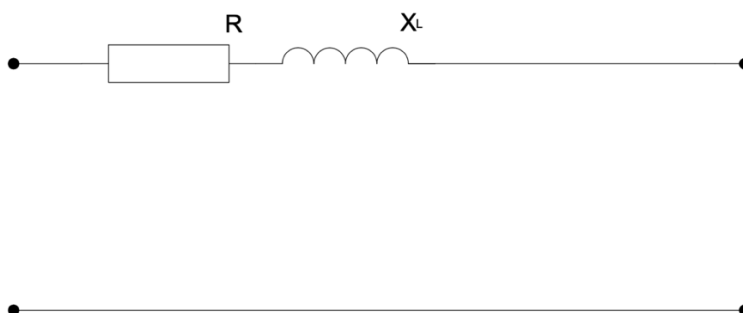
³ Je uveden trojúhelník admitance s kapacitním charakterem

Základní parametry vedení jsou tedy rozděleny na podélné (R , X_L) a příčné (B_C , G). Jejich uspořádání je definováno náhradním schématem vedení, viz obrázek 3.



Obrázek 3 - Náhradní schéma vedení

V případech řešení ustálených dějů na vedení, které je zatíženo jmenovitým proudem, lze příčné parametry zanedbat a počítat nadále pouze s podélnými. Náhradní schéma se následně zjednoduší do podoby dle obr. 4.



Obrázek 4 – Zjednodušené náhradní schéma vedení po zanedbání příčných parametrů vedení

1.2. Základní členění sítí dle napěťové hladiny

Elektrická síť je chápána jako soubor galvanicky spojených elektrických zařízení za předpokladu zachování stejné napěťové hladiny. Elektrizací soustava je vzájemně propojený soubor zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny, včetně elektrických přípojek, přímých vedení, a systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky, a to na území České republiky. [1]

Distribuční soustavou rozumíme vzájemně propojený soubor vedení a zařízení o napětí 110 kV, s výjimkou vybraných vedení a zařízení o napětí 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy, a vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 1,5 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV nebo 35 kV sloužící k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území České republiky, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky včetně elektrických přípojek ve vlastnictví provozovatele distribuční soustavy. [1]

Tabulka 1 - Normalizované napětové hladiny [2]

Název napětové hladiny	Zkratka	Kategorie	Rozsahy napětových hladin (AC)	
			Fázové napětí U_f ⁴	Sdružené napětí U_S ⁵
<i>Malé napětí</i>	<i>MN</i>	<i>I</i>	<i>do 50 V</i>	<i>do 50 V</i>
<i>Nízké napětí</i>	<i>NN</i>	<i>II</i>	<i>50 – 600 V</i>	<i>50 – 1000 V</i>
<i>Vysoké napětí</i>	<i>VN</i>	<i>A</i>	<i>0,6 – 30 kV</i>	<i>1 – 52 kV</i>
<i>Velmi vysoké napětí</i>	<i>VVN</i>	<i>B</i>	<i>30 – 171 kV</i>	<i>52 – 300 kV</i>
<i>Zvlášť vysoké napětí</i>	<i>ZVN</i>	<i>C</i>	-	<i>300 – 800 kV</i>
<i>Ultra vysoké napětí</i>	<i>UVN</i>	<i>D</i>	-	<i>800 a více kV</i>

Nadřazená síť je část elektrizační soustavy, která má z hlediska provozu větší důležitost než ostatní části, které sama napájí – zpravidla elektrické sítě nižší napětové hladiny. Nadřazená síť se určí z pohledu napájené sítě nižší důležitosti/napětí, než sama je⁶. Elektrizační soustava je rozdělena na dvě základní části, a to přenosovou a distribuční, viz Tabulka 2. [1]

Tabulka 2 - Jmenovité napětové hladiny používané v ČR – určení části elektrizační soustavy [2]

Název napětové hladiny	Jmenovité napětové hladiny používané v ČR	Část elektrizační soustavy
<i>Nízké napětí</i>	<i>0,4 kV</i>	<i>Distribuční</i>
<i>Vysoké napětí</i>	<i>6, 10, 22, 35 kV</i>	<i>Distribuční</i>
<i>Velmi vysoké napětí</i>	<i>110 kV</i>	<i>Distribuční / Přenosová</i>
<i>Zvlášť vysoké napětí</i>	<i>220, 400 kV</i>	<i>Přenosová</i>

1.3. Elektrická vedení

Elektrická vedení rozlišujeme na 3 základní kategorie, a to vedení venkovní, kabelová a smíšená. O smíšených vedeních hovoříme z hlediska kompenzace zemních proudů tehdy, pokud je podíl venkovních vedení v síti > 0,1 a podíl kabelových vedení je > 0,02 celkové délky sítě. [3]

Kabelizace na hladině NN v zásobovacím území E.ON Distribuce byla v roce 2018 na úrovni 65% vůči celkové délce vedení NN. Pro hladinu VN bylo ke stejnému datu kabelizováno 20% celkové délky vedení VN. [4]

Kabelová vedení jsou dnes trendem zejména v oblastech intravilánu. Je tomu tak jednak z důvodu estetického (kabelové vedení „nehyzdí“ krajinu), ale také z důvodu redukovaného ochranného pásma na hodnotu 1 m (do 110 kV) oproti 7 m v případě holého venkovního vedení od 1 do 35 kV.[1]

⁴ Efektivní hodnota fázového napětí

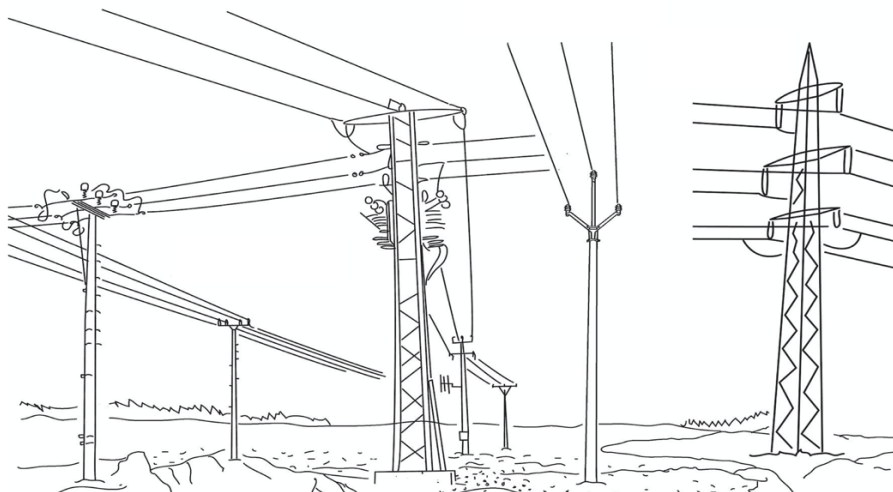
⁵ Efektivní hodnota sdruženého napětí

⁶ Např. pro vedení NN 0,4 kV je typickou nadřazenou sítí elektrická síť VN 22 kV.

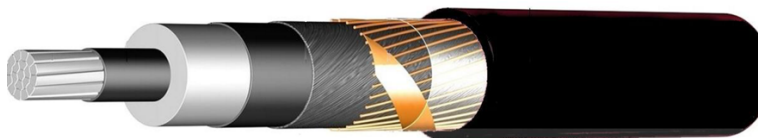
Obecnou vizí je v co největší míře eliminovat a odstraňovat rizika, která mohou přerušit spolehlivý chod elektrického zařízení. V posledních letech je do této vize také zapojena kabelizace těch úseků elektrického vedení, které jsou těmto, zejména vnějším rizikům, vystaveny. Kabelová vedení jsou oproti venkovním vedení významně nákladnější z pohledu výstavby (složitá majetková projednávání, provedení výkopu, cena kabelu, ...). Ovšem z pohledu provozování je správně provedené kabelové vedení dlouhodobě spolehlivější vlivem nepatrné poruchovosti. Toto platí zejména v případech nových kabelů s izolací ze zesíťného polyetylénu. Starší typy kabelů s papírovou izolací jsou na tom s četností plášťových poruch o poznání hůře.

Venkovní vedení disponují značnou mírou nehomogenity. Z toho plyne kapacitní nesymetrie mezi jednotlivými fázemi. Kabelová vedení se v tomto ohledu dají považovat za téměř homogenní. [12]

Mimo zmíněných provozních výhod, mají kabelová vedení i svoje nevýhody. Pro laickou veřejnost a pro celkový dojem je provedení kabelového vedení přínosem zejména z pohledu estetického. Pro provozovatele těchto sítí to ovšem znamená o poznání horší přehlednost, co se topologie a zapojení týče. Galvanická propojení jednotlivých prvků elektrizační soustavy jsou lépe rozlišitelná u vedení venkovních, kde jsou tyto přímo viditelná. V dnešní době všeobecné digitalizace a zvyšování bezpečnostních standardů, jsou ovšem tyto výhody potlačovány a o přehlednosti již můžeme hovořit i v případě rozsáhlejších a topologicky složitějších kabelových vedení. Obecně můžeme říci, že kapacitní proudy kabelových sítí dosahují řádově 20–80-ti násobků kapacitních proudů vedení venkovních při zachování srovnatelných přenosových parametrů. Vlivem narůstajícího trendu kabelizace a tím nárůstu kapacitních proudů rozsáhlejších elektrických sítí je nutná jejich kompenzace či jiný způsob uzemnění uzlů izolovaných sítí. [5]



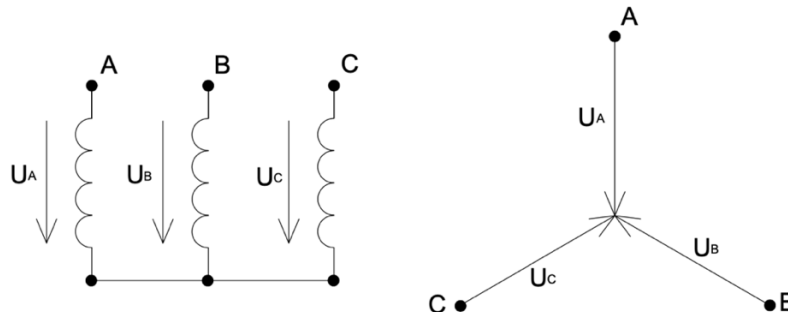
Obrázek 5 - Příklady holého venkovního vedení [16]



Obrázek 6 - Příklad řezu podzemním kabelem 22-AXEKVCEY [15]

1.4. Uzel sítě

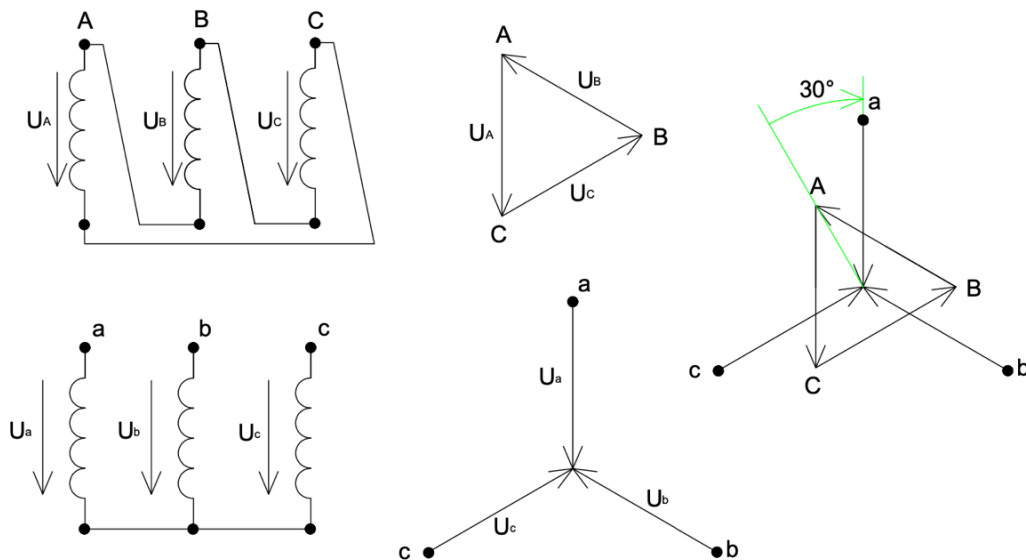
Pokud zapojíme vinutí transformátoru do hvězdy, vznikne střední bod sítě – nulový uzel. Podle způsobu provedení uzlu rozlišujeme síť s uzlem izolovaným od země, uzemněným přes odpor, přímo uzemněným nebo s uzemněným přes zhašecí tlumivku (kompenzovaná síť). [12]



Obrázek 7 – Vinutí transformátoru zapojené do hvězdy

Nejčastěji se sekundární strana transformátoru 22/0,4 kV zapojuje do hvězdy. Použití lomené hvězdy je velice ojedinělé a využívá se ho zejména u malých výkonů (do 100 kVA). Většinou se u těchto transformátorů používá zapojení Dyn1. Primární vinutí je zapojeno do trojúhelníku a sekundární do hvězdy s posunem fázového napětí o 30° vůči primárnímu. Posun je realizován tzv. hodinovým úhlem.

Hodinovým úhlem je vyjadřován posun fázového napětí sekundární strany transformátoru vůči fázovému napětí strany primární. Úhel se uvažuje vždy ve směru hodinových ručiček celým číslem – násobkem úhlu 30° , tj. úhlu jedné elektrické hodiny. [8]



Obrázek 8 – Zapojení transformátoru Dyn1

1.5. Rozdělení sítí dle provedení uzlu sítě a uzemnění neživých částí sítě

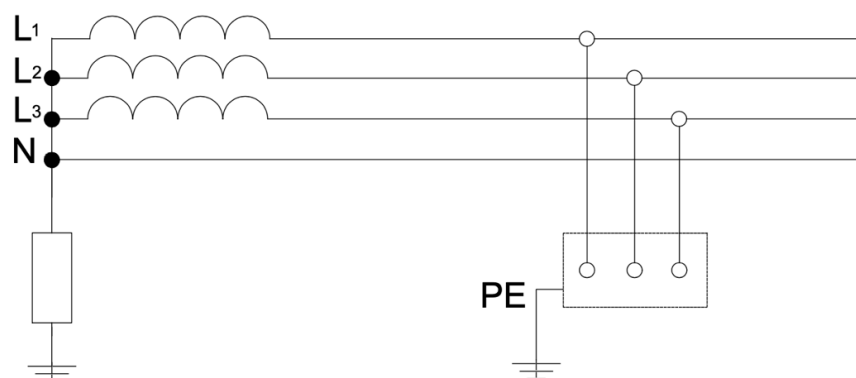
1.5.1. Sít' IT

Uzel sítě je od země buď izolován, uzemněn přes zhášecí tlumivku nebo uzlový rezistor – není tedy uzemněn přímo. Neživé části jsou uzemněny na sobě nezávislými samostatnými zemniči. Vyvedený střední vodič (N), zde neplní funkci ochranného vodiče. [12]

U těchto sítí se setkáváme s hojným použitím v průmyslových odvětvích, zdravotnictví aj. Výhoda těchto sítí spočívá v absenci možnosti vzniku jednofázového zkratu. Pokud dojde k první poruše, která nemá charakter vícefázového zkratu, tak díky izolovanému uzlu nedojde k automatickému vybavení ochran. K automatickému odpojení od zdroje dojde až při vzniku druhé poruchy s charakterem vícefázového zkratu. Pokud je daná fáze vodič spojena se zemí na více místech sítě, stále se jedná pouze o vícenásobné propojení dvou potenciálů (potenciálu země a postižené fáze).

Sít' IT je používána jako hlavní technické řešení pro distribuci na hladině VN ($U_s = 22$ a 35 kV). Zde není z uzlu transformátoru vyveden vodič N jako pracovní, slouží pouze jako místo pro případné přizemnění uzlu či vřazení kompenzačního zařízení.

Problematicke těchto sítí zejména z pohledu technického řešení jejího uzlu se budu věnovat v dalších kapitolách.



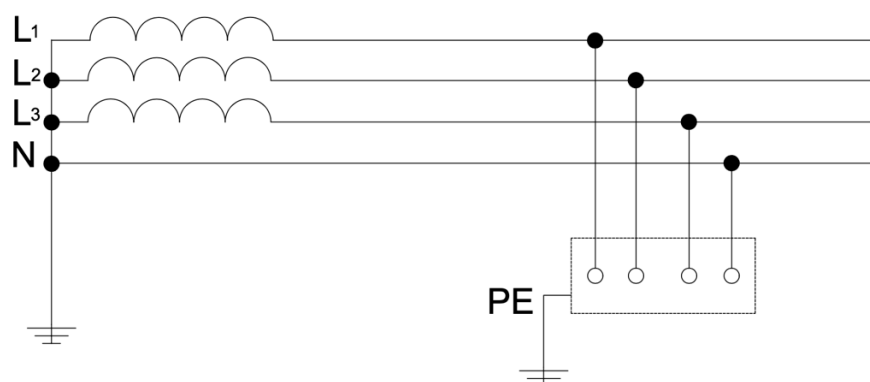
Obrázek 9 – Schéma sítě IT

1.5.2. Sít' TT

Uzel sítě je přímo uzemněn a neživé části jsou uzemněny na sobě nezávislými samostatnými zemniči. Vyvedený střední vodič (N) zde neplní funkci ochranného vodiče. [12]

Takto provozované sítě se používají zejména v oblastech přenosových sítí na hladině 400 a 220 kV, a také na hladině distribučních sítí 110 kV. Zde není z uzlu transformátoru vyveden vodič N jako pracovní, slouží pouze jako uzemnění uzlu.

První porucha zapříčiní okamžité vybavení nadproudových ochran. Proto jsou v těchto sítích nasazovány automatiky opětovného zapnutí.

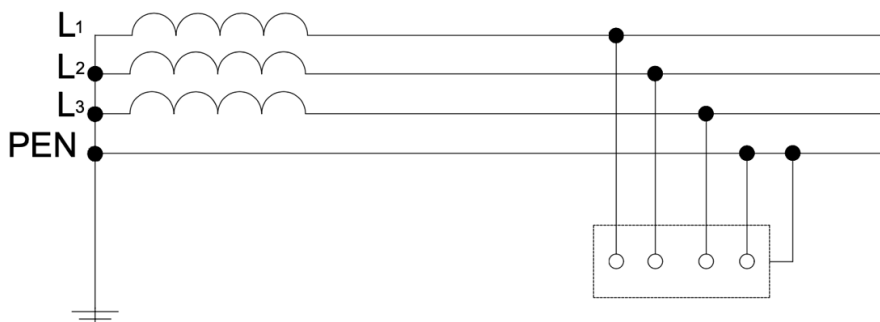


Obrázek 10 – Schéma sítě TT

1.5.3. Sít' TN-C

Uzel sítě je přímo uzemněn a neživé části jsou vzájemně pospojovány a zemněny společně s uzlem sítě vodičem PEN – spolehlivé uvedení neživých částí na stejný potenciál. Vodič PEN v sobě slučuje funkci ochranného a středního vodiče.

Typicky vzniká sít' TN-C vyvedením sekundárního vinutí transformátoru 22/0,4 kV a sahá až do nulového můstku na konkrétním odběrném místě. Jedná se o nejrozšířenější typ distribuční sítě na hladině 400/230 V. [6]

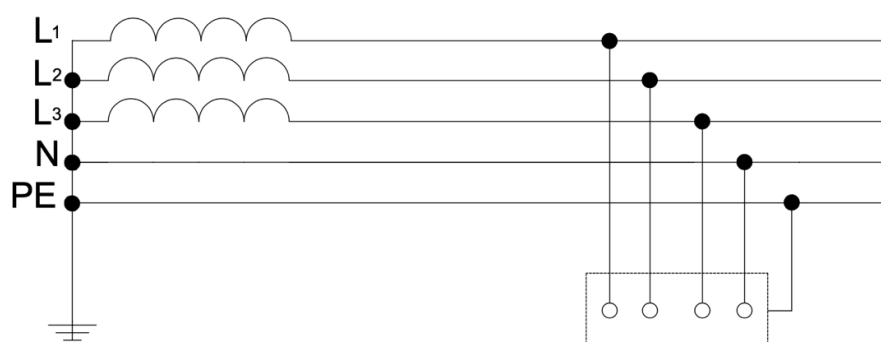


Obrázek 11 - Schéma sítě TN-C

1.5.4. Sít' TN-S

Uzel sítě je přímo uzemněn a neživé části jsou vzájemně pospojovány a zemněny společně s uzlem sítě vodičem PE – spolehlivé uvedení neživých částí na stejný potenciál. Ochranný (PE) a střední (N) vodič jsou v této síti odděleny. [6]

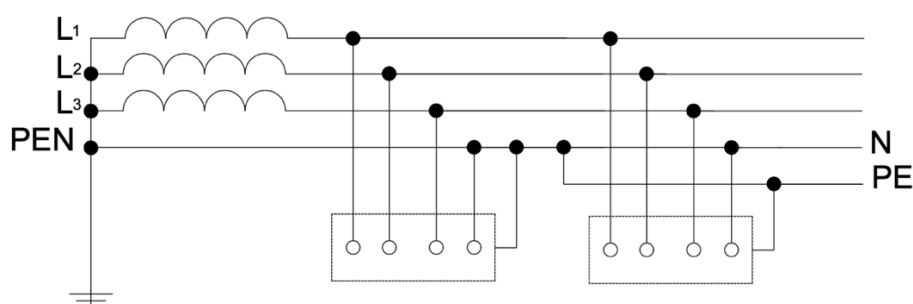
Sít' TN-S neboli instalační sít', vzniká rozpojením vodiče PEN na dva samostatné vodiče PE a N dle jejich příslušných funkcí. Význam těchto sítí oproti síti TN-C spočívá zejména v možnosti použití proudových chráničů (automatické odpojení všech pracovních vodičů od zdroje v případě vzniku reziduálního proudu mezi L1, L2, L3 a N). U TN-C takto řešit nelze – byl by rozpojen kompletní vodič PEN (pracovní i ochranná funkce).



Obrázek 12 – Schéma sítě TN-S

1.5.5. Sít' TN-C-S

Uzel sítě je přímo uzemněn a neživé části jsou vzájemně pospojovány a zemněny společně s uzlem sítě. V části sítě je ochranný (PE) a střední (N) vodič sloučen do jednoho vodiče PEN (sít' TN-C) a v části sítě je funkce těchto vodičů rozdělena. Pokud v této síti dojde k rozdělení vodiče PEN na dva samostatné vodiče PE a N, již nesmí dojít k jejich opětovnému spojení. [6]



Obrázek 13 - Schéma sítě TN C-S

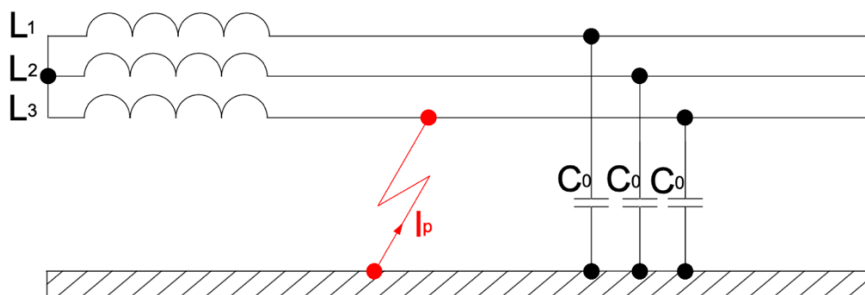
2. Teoretický rozbor zemního spojení a možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů

2.1. Zemní spojení

Pokud dojde v síti s uzemněným uzlem k vodivému spojení jedné libovolné fáze vedení se zemí, vznikne jednofázový zkrat. V případě, kdy k takovému vodivému spojení dojde v síti s nepřímým uzemněným či izolovaným uzlem sítě, nazýváme tento stav zemním spojením. [9]

Zásadní rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením je v tom, že zkratový proud je většinou mnohonásobně větší, než proud provozní (nebo je blízký provoznímu proudu) a má indukční charakter, kdežto v místě zemního spojení prochází pouze relativně malý proud kapacitního charakteru. Další zvláštností tohoto proudu je, že nezávisí na vzdálenosti od zdroje (je přibližně stejný ve všech místech sítě). V izolovaných sítích v ustáleném provozním stavu procházejí kapacitami fázový vodič-zem kapacitní proudy, jejichž součet je při symetrické síti a symetrickém napětí roven nule. [7]

Velkou část z celkového počtu poruch typu zemního spojení tvoří na hladině VN pády stromů a lesního porostu do venkovního vedení – uvnitř i vně ochranného pásma. Těmto vnějším vlivům v případě venkovního holého vedení bohužel provozovatel nemůže zcela zabránit ani striktním dodržováním ochranného pásma, které je definováno energetickým zákonem. K velké části těchto poruch dochází právě pádem stromů, které ústí mimo ochranné pásmo. Tento provozní, bezpečnostní a spolehlivostní aspekt lze efektivně podchytit právě již zmíněnou kabelizací. Pády porostu a cizích předmětů do vedení samozřejmě nejsou jedinou příčinou vzniku zemního spojení. Dalšími jsou například průrazy na izolátorech a selhání izolátorových vazů (pády vodičů na konzole). Provoz kabelových vedení je v těchto ohledech stabilnější. Významný podíl na zemních spojeních zde mají cizí zásahy do kabelů a plášťové poruchy zejména starších kabelů.



Obrázek 14 - Zemní spojení v kapacitně souměrné izolované síti

2.1.1. Druhy zemních spojení

Podle doby trvání lze zemní spojení rozdělit na:

- Mžiková s dobou trvání do 5 s
- Krátkodobá s dobou trvání od 5 s do 10 minut
- Dlouhodobá/trvalá zemní spojení s dobou trvání nad 10 minut

Speciálním typem zemních spojení jsou spojení přerušovaná. V těchto případech se jedná o za sebou jdoucí přerušovaná mžiková zemní spojení (přerušované nestabilní hoření oblouku). Podle charakteru zemního spojení a velikosti přechodového odporu mezi fází a zemí se rozlišují následující. [13]

2.1.1.1. Kovové zemní spojení

Při tomto typu zemního spojení je hodnota přechodového odporu na úrovni jednotek Ω . Jedná se o poměrně specifickou poruchu s ojedinělým výskytem.

2.1.1.2. Obloukové zemní spojení

Hodnota přechodového odporu dosahuje desítek až stovek Ω . Odpor je tvořen ve většinové míře odporem oblouku. Tato porucha je velmi nebezpečná z důvodu vznikajících krátkodobých přepětí a s tím souvisejících proudových špiček. Tento jev vzniká zejména u poruch tohoto typu z důvodu nestabilního hoření oblouku – ten se mžikově přerušuje. [9]

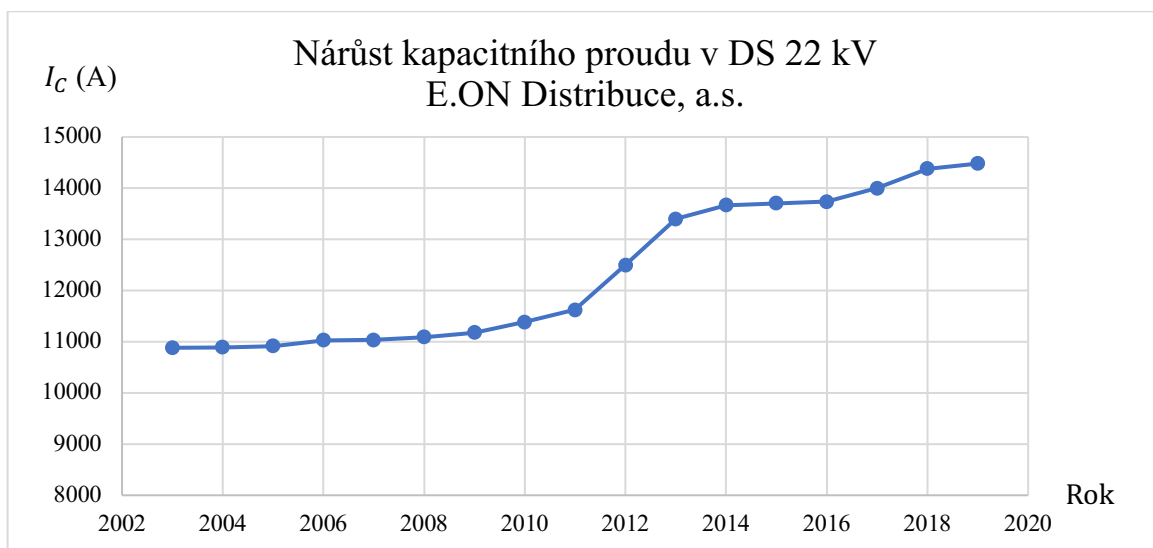
2.1.1.3. Odporové zemní spojení

V tomto případě dosahuje přechodový odpor hodnot stovek až tisíců Ω . Pokud hodnota vzroste nad hranici 1 k Ω , pak mluvíme o vysoko-odporovém zemním spojení. Tyto jsou následně obtížně měřitelné a lokalizovatelné. [13]

2.2. Kapacitní proudy

Kapacitní proudy jednotlivých fází jsou dány rozsahem a provedením celé sítě. Dle PNE 33 0000 1 uvažujeme pro venkovní holé vedení 22 kV bez zemnicího lana kapacitní proud 6 A na 100 km. Pro jednožilové kabelové vedení 22 kV s izolací XLPE a průřezem vodičů 150 mm² uspořádaných do trojúhelníkového svazku počítáme s kapacitním proudem 276 A na 100 km. Kapacita takového kabelového vedení roste 20 – 80x oproti vedení venkovnímu. [5]

S narůstajícím trendem budování nových venkovních vedení a kabelizací některých stávajících venkovních vedení při obnovách rostou také velikosti kapacitních proudů jednotlivých sítí a elektrizační soustavy jako celku. Obrázkem 15 jsem zde znázornil nárůst kapacitního proudu v oblasti E.ON Distribuce, a.s. Základními vstupními daty jsou pro tvorbu grafu hodnoty vyladění jednotlivých tlumivek v DS. Předpokládá se, že vyladění bylo v okamžiku odečtu daných hodnot ideální, všechny tlumivky tedy byly naladěny na aktuální zapojení distribuční sítě.



Obrázek 15 – Nárůst kapacitního proudu v DS 22 kV E.ON Distribuce, a.s. v letech 2002 – 2020

Na přesnost podobných analýz v tomto časovém rozsahu mají negativní vliv metody odečítání hodnot a také systémové změny řízení DS. Abychom získali zcela přesné hodnoty, museli bychom v celém časovém rozsahu sběru dat nastavit naprosto stejné podmínky jak v DS, tak i v metodice odečtu. Z následujícího grafu je tedy zřejmý minimálně trend růstu zmíněných kapacitních proudů.

Vyšší hodnoty kapacitních proudů nejsou způsobeny jen častější kabelizací sítí VN, projevuje se také hledisko způsobu řízení dané distribuční soustavy. Provozovatelé distribučních soustav se snaží zachovat co největší kontinuitu dodávky, tedy co nejvíce poruch vymanipulovat ať už na kruhovatelných odbočkách či kmenových vedeních. Tento způsob pozitivně ovlivňuje ukazatele SAIDI a SAIFI. Tuto možnost poskytuje provoz sítě se zhášecí tlumivkou. Trendem je provozování i kabelových sítí se zhášecí tlumivkou, protože nové kabely VN s izolací ze zesíťovaného polyetylénu nejsou tolik náchylné na násobné poruchy jako starší typy kabelů s olejem napuštěnou papírovou izolací. Tento způsob provozování může být aplikován do 400 A kapacitního proudu sítě.[10]

2.2.1. Kompenzace zemních kapacitních proudů

Kompenzace zemních kapacitních proudů je omezování zemního kapacitního proudu v elektrických sítích vysokého napětí, tekoucího místem zemního spojení, pomocí proměnné indukčnosti (kompenzační tlumivky) zapojené mezi nulový uzel sítě a zem. [3]

2.3. Rozdělení izolovaných sítí dle způsobu provedení uzlu

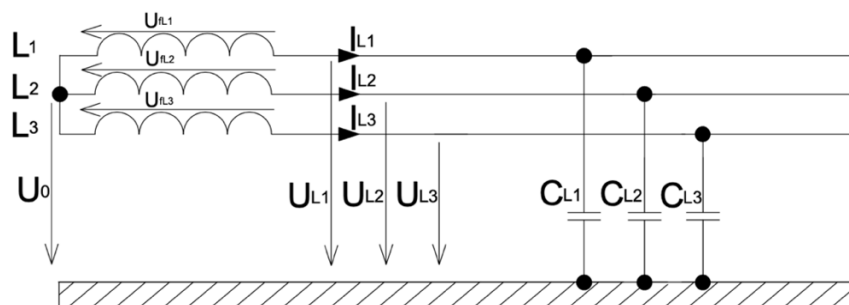
V této kapitole jsou podrobně rozebrány jednotlivé způsoby provedení izolovaných uzlů, možnosti jejich použití a rozboru proudových a napěťových poměrů při zemních spojeních.

2.3.1. Sítě s izolovaným uzlem

Uzel sítě je v tomto případě od země zcela izolován, platí tedy následující vztah:

$$\hat{Z}_N \rightarrow \infty \Omega \quad (2.1)$$

Obecně platí, že je síť s izolovaným uzlem provozována zejména v malých (lokálních /průmyslových) distribučních sítích, přičemž hodnota celkového kapacitního proudu sítě nepřesáhne mezní hodnotu 10 A. Pokud dojde k zemnímu spojení, potom je kapacitní proud procházející místem zemního spojení roven fázorovému součtu kapacitních proudů „zdravých“ nepostížených fází daného vývodu. [12]



Obrázek 16 – Trojfázová síť s izolovaným uzlem

$$\hat{U}_{L1} - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fL1} = 0 \quad [V] \quad (2.2)$$

$$\hat{U}_{L2} - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fL2} = 0 \quad [V] \quad (2.3)$$

$$\hat{U}_{L3} - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fL3} = 0 \quad [V] \quad (2.4)$$

$$\hat{I}_{L1} = j\omega C_{L1} \hat{U}_{L1} \quad [A; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}; F; V] \quad (2.5)$$

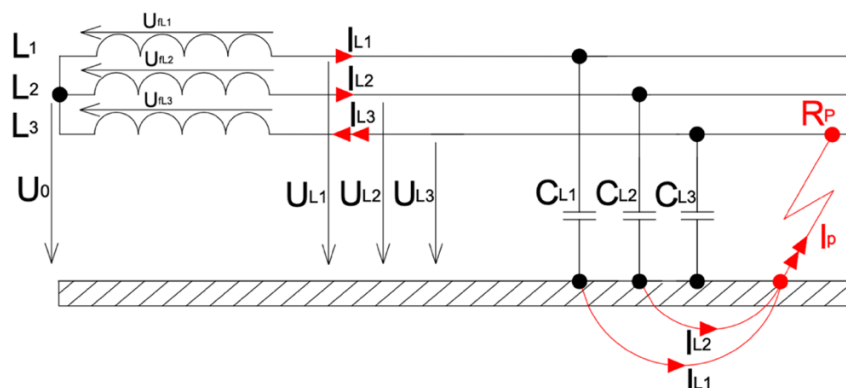
$$\hat{I}_{L2} = j\omega C_{L2} \hat{U}_{L2} \quad [A; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}; F; V] \quad (2.6)$$

$$\hat{I}_{L3} = j\omega C_{L3} \hat{U}_{L3} \quad [A; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}; F; V] \quad (2.7)$$

$$\hat{I}_{L1} + \hat{I}_{L2} + \hat{I}_{L3} = 0 \quad [A] \quad (2.8)$$

[9]

2.3.1.1. Dokonalé trvalé zemní spojení v kapacitně symetrické izolované síti

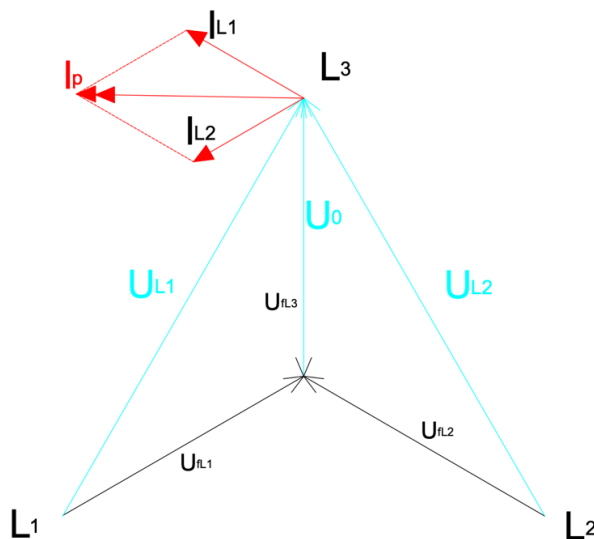


Obrázek 17 – Zemní spojení v souměrně izolované síti

Pokud nastane trvalé zemní spojení v izolované síti, kde přechodový odpor zemního spojení vychází ze vztahu:

$$R_P \rightarrow 0\Omega \quad (2.9)$$

Proud \hat{I}_P procházející místem zemního spojení je fázově posunut o $\frac{\pi}{2}$ a předbíhá tak napětí uzlu \hat{U}_0 . Napětí uzlu \hat{U}_0 je rovno hodnotě fázového napětí sítě. Hodnoty napětí zdravých fází vzrostou na hodnotu sdružených napětí. Napětí postižené fáze klesne na hodnotu k nule. Proud \hat{I}_P je tak roven vektorovému součtu kapacitních proudů zdravých fází, které jsou vůči svým fázovým napětím též posunuty o $+\frac{\pi}{2}$. Za těchto předpokladů lze vyjádřit napěťové a proudové poměry pomocí fázorového diagramu následovně: [13]

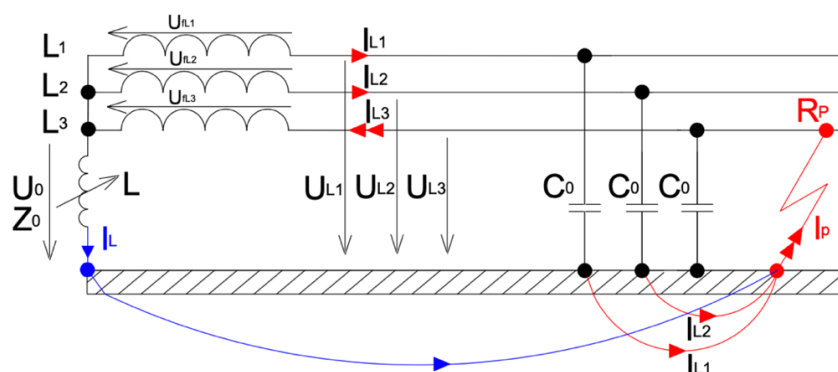


Obrázek 18 – Fázorový diagram pro stav sítě dle obr. 17

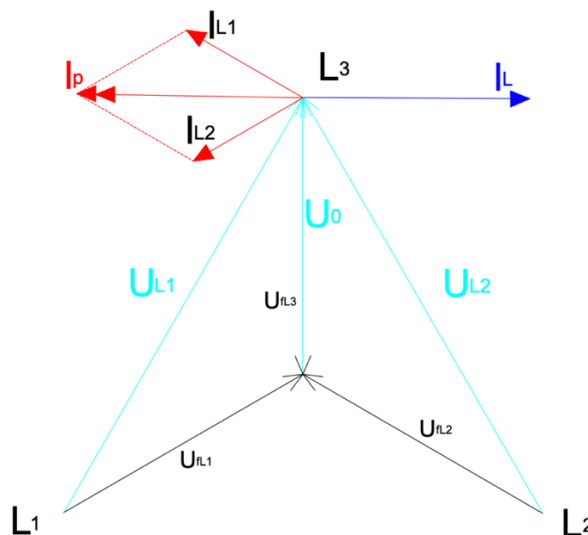
2.3.2. Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku

Na rozdíl od sítě s izolovaným uzlem jsou tyto sítě uzemněny přes zhášecí tlumivku, která spojuje uzel sítě s uzemňovací soustavou. Zhášecí tlumivka je schopná omezit poruchový proud procházející místem zemního spojení tím, že dodává do sítě induktivní složku proudu. Vzhledem ke skutečnosti, že místem zemního spojení protéká velký poruchový proud kapacitního charakteru, je nutné ho kompenzovat. Udávaná hranice kapacity sítě, kdy je nutné kompenzovat, je 10 A. Proud induktivního charakteru dodávaný tlumivkou je fázově posunutý o hodnotu π vůči kapacitnímu proudu sítě, tyto proudy se tedy vektorově odečtou. Místem zemního spojení následně protéká již pouze zbytkový proud činného charakteru. Na činnou složku impedance uzlu vůči zemi je zde oproti izolované síti požadavek na nízký odpor, ideálně: [7]

$$R_N \rightarrow 0 \Omega \quad (2.10)$$



Obrázek 19 – Princip funkce kompenzace zemního spojení na L3 pomocí kompenzační tlumivky

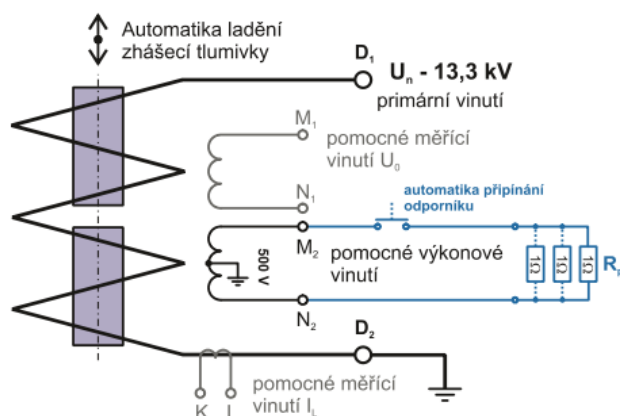


Obrázek 20 – Fázorový diagram pro stav sítě viz obr. 19

Princip konstrukce fázorového diagramu včetně napěťových poměrů je stejný jako v případě sítě s izolovaným uzlem, viz výše. Vlivem indukčního kompenzačního proudu tlumivky se mění výsledný fázor poruchového proudu. Ten se, jak bylo již zmíněno, skládá pouze ze zbytkového proudu (nepřesnosti v nastavení tlumivky, činná složka způsobená svody na vedení a činným odporem zhášecí tlumivky).

2.3.2.1. Zhášecí tlumivka

Vlivem různých provozních stavů a manipulací v síti, není kapacita sítě konstantním údajem. Provozovatel sítě různě konfiguruje z důvodu plánovaných odstávek, vymezování poruchových úseků či jiných provozních stavů. Tyto konfigurace mají značný vliv na rozsah galvanicky propojené elektrické sítě a tím i na výslednou kapacitu sítě jako celku. Pro zajištění automatického vykompenzování sítě jsou instalovány automaty ladění tlumivky.



Obrázek 21 - Zhášecí tlumivka s automatikou přepínání odporů k výkonovému vinutí [13]

Během provozu jsou tlumivky laděny automatikou, která nastavuje zhášecí tlumivku do paralelní rezonance s celkovou kapacitou provozované sítě tak, aby místem zemního spojení procházel pouze malý zbytkový reziduální proud. Proto se někdy těmto tlumivkám říká rezonanční, případně Petersenovy. [13]

Každá zhášecí tlumivka musí být vybavena pomocným výkonovým vinutím, zatížitelným 50% z jmenovitého výkonu zhášecí tlumivky po dobu 10s. Toto vinutí je používáno zejména pro zvyšování činné složky proudu zemního spojení při dohledávání vývodu s poruchou. Toto pomocné výkonové vinutí je zatěžováno paralelní kombinací odporů o hodnotě 1Ω. Tyto odpory jsou automaticky spínány automatikou na základě potřeby v konkrétní síti. Odpory jsou připojovány pouze v případech trvajících zemních spojení. Automatika tedy vyčká, zda zemní spojení neustane samovolně. Měřicí obvod automaty vyhodnotí zemní spojení, pokud dojde ke zvýšení napětí na měřicím obvodu zhášecí tlumivky nad zvolenou mez (obvykle 10-70 % jmenovitého napětí). Časové zpoždění mezi vznikem zemního spojení a povel na připojení paralelního odporu je volitelný mezi 0,5-10 s. Ten zůstává sepnut cca 1-3 s [12]. Potřebnou indukčnost zhášecí tlumivky může zjistit pomocí vztahu:

$$L_K = \frac{1}{3\omega^2 C_0} \quad [\text{H}; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}; \text{F}] \quad (2.11)$$

Stanovení zdánlivého výkonu zhášecí tlumivky vychází ze vztahu:

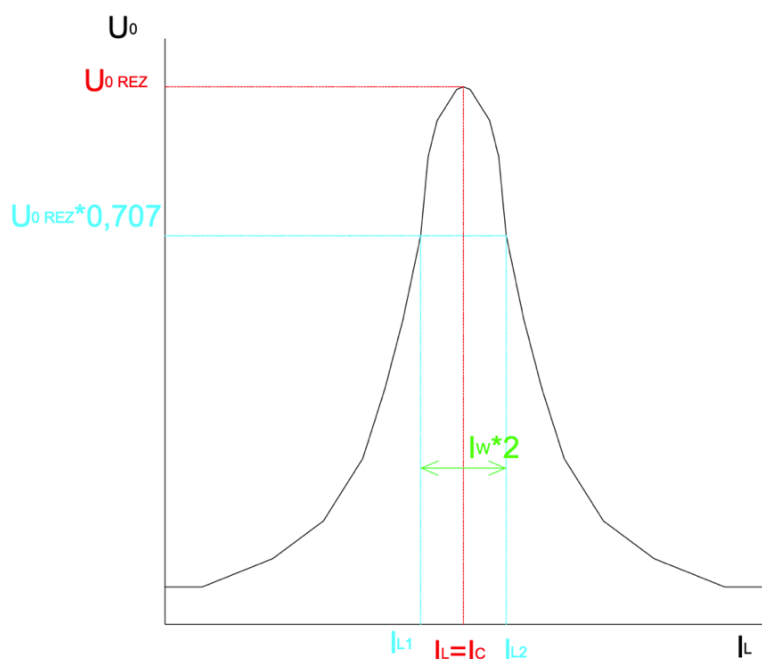
$$S_K = j\omega C_0 U^2 \quad [\text{VA}; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}; \text{F}; \text{V}] \quad (2.12)$$

Výkon zhášecí tlumivky se volí s ohledem na předpokládaný rozvoj sítě a potřebné provozní manipulace obvykle o 30-50% větší než, odpovídá danému rozsahu sítě. [12]

2.3.2.2. Rezonanční křivka zhášecí tlumivky

Nezbytným prostředkem pro správnou kompenzaci kapacitního proudu je znalost rezonanční křivky soustavy. Tato křivka vyjadřuje závislost uzlového napětí U_0 na kompenzačním proudu procházejícím tlumivkou I_L pro danou oblast distribuční soustavy. Zjišťování rezonanční křivky se provádí postupným laděním zhášecí tlumivky, která je připojena k soustavě bez zemního spojení při průběžném odečítání hodnot U_0 a I_L . Zjišťování rezonanční křivky je však možné pouze soustav nesymetrických, jako jsou soustavy s vysokým podílem venkovního vedení, které se projevují značnou nesymetrií fázových napětí vůči zemi. U kabelových sítí, které se naopak projevují dobrou symetrií fázových napětí (plochá rezonanční křivka), je nutné pro zajištění korektní funkce zhášecí tlumivky a pro zjištění charakteristických hodnot vytvořit umělou nesymetrii soustavy. [13]

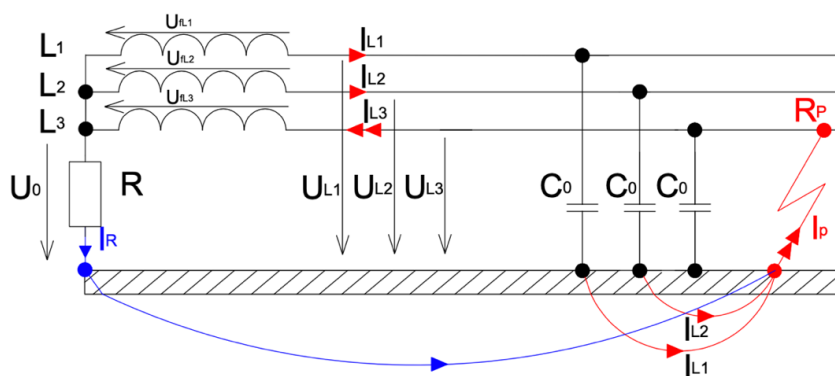
Z charakteristiky rezonanční křivky lze následně zjistit potřebné charakteristické hodnoty sítě, jako jsou velikost kapacitního proudu I_C provozované sítě, který je roven kompenzačnímu proudu v místě rezonančního napětí U_{0-rez} , dále pak velikost svodového proudu I_W , činitel útlumu sítě α , činitel nesymetrie sítě ε . [13]



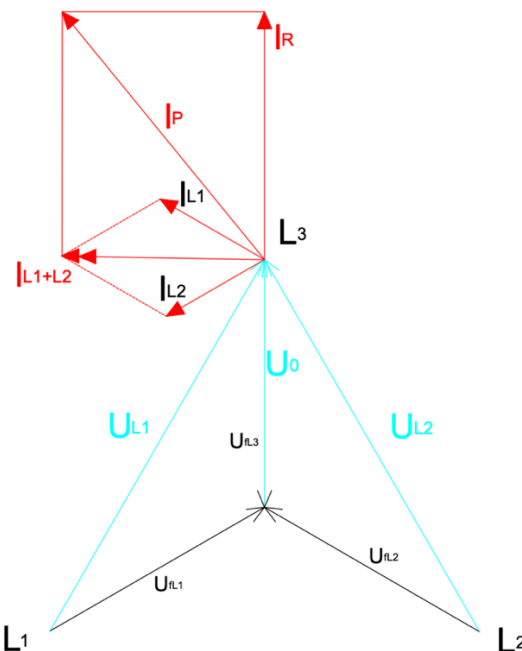
Obrázek 22 - Rezonanční křivka

2.3.3. Síť s uzlem uzemněným přes rezistor

Na rozdíl od sítě s uzlem uzemněným přes tlumivku, není síť s uzlem uzemněným přes rezistor schopna kompenzovat kapacitní proudy sítě v případě zemního spojení. V praxi se použití těchto sítí dosti liší právě od zmíněných sítí kompenzovaných. Kompenzované síť je vhodné použít tam, kde hrozí velké množství přechodných zemních spojení, aby zde nedocházelo k automatickým vypínání – typickým použitím jsou sítě venkovního vedení, kde jsou tyto jevy časté. Pokud ovšem dojde k zemnímu spojení na vedení kabelovém, je žádoucí toto vedení co nejrychleji odstavit. Zemní spojení v případě kabelového vedení znamená vždy narušení izolace a nestandardní stav. To znamená, že využití pro síť s uzlem uzemněným přes rezistor nalézáme právě tam, kde je malý počet zmíněných přechodných poruch.



Obrázek 23 - Síť s uzlem uzemněným přes rezistor



Obrázek 24 - Fázorový diagram pro stav sítě viz obr. 23

Princip konstrukce fázorového diagramu včetně napětových poměrů stále zůstává, viz výše. Vlivem činného proudu, který je ve fázi s napětím U_0 , dochází vektorovým součtem s kapacitními proudy zdravých fází ke zvýšení proudu poruchového.

$$I_P = I_R + I_{L1,L2} \quad [A] \quad (2.13)$$

Pokud dosahují kapacitní proudy sítě více než 400 A, je provedení uzemnění uzlu sítě přes rezistor nutné. Na rozdíl od zhášecí tlumivky je rezistor schopen omezovat přepětí vznikající při zemních spojeních, zejména při nestabilním hoření oblouku. Tlumivka díky svému minimálnímu činnému odporu nedokáže přepětíové vlny účinně tlumit. [12]

Velikost hodnoty odporu uzlového rezistoru se řídí následujícím vztahem [19]:

$$R_N = \frac{U}{I_C} \quad [\Omega; V; A] \quad (2.14)$$

Zemní spojení je nebezpečný a nestandardní jev a provozní stav v elektrické síti. Vznikem zemního spojení vzniká výboj – oblouk. Elektrický oblouk má svými vlivy na elektrické zařízení a jeho okolí postupné degradační účinky. V zájmu zajištění dlouhodobé životnosti a splnění normativních požadavků na bezpečné a spolehlivé provozování elektrických sítí, jsou izolované sítě větších rozsahů kompenzovány či přizemněny odporem.

2.4. Tepelné účinky elektrického oblouku při zemním spojení

Obrázky č. 25 a č. 26 reprezentují průběh průchodu zemního proudu přes rovinnou konzoli do těla jednoduchého betonového podpěrného bodu na hladině 22 kV v izolované kompenzované síti IT distribuční společnosti E.ON Distribuce, a.s. Toto konkrétní strojené zemní spojení probíhalo na vedení Řečice z rozvodny Jindřichův Hradec. První měření probíhalo s rozepnutým spínačem přípojnic, kapacitní proud sítě byl 142 A. Během zemního spojení byl zemní poruchový proud vypočítán na 10,4 A. V druhém měření byl sepnut spínač přípojnic a tím bylo docíleno celkového kapacitního proudu 290 A. Během zemního spojení bylo na základě hodnot odečtených z tlumivky zjištěn poruchový proud 13,6 A. Měření mělo simulovat, k jakým poškozením může docházet u neuzemněných železobetonových stožárů průtokem proudu zemního spojení a to i přes to, že je síť provozována jako kompenzovaná. Tepelný účinek elektrického oblouku způsobil nenávratné poškození konzole a hlavy podpěrného bodu. [14]



Obrázek 25 - Průchod proudu přes konzoli do těla betonového sloupu⁷ [14]



Obrázek 26 - Termovizní snímek průchodu proudu přes konzoli do těla betonového sloupu [14]

⁷ Podpěrný bod neuzemněný – přechodový odpor zemního spojení byl od 50–190Ω

2.5. Vlastní podstata kompenzace zemních kapacitních proudů

2.5.1. Účinky elektrického oblouku na zařízení sítě

První klíčová podstata kompenzace zemních kapacitních proudů je naznačena v bodě 2.4, a to sice, že snížením poruchového proudu procházejícího místem zemního spojení docílíme snížení následných poškození na síti. Negativně se elektrický oblouk na elektrickém zařízení projevuje zejména tepelnými účinky.

2.5.2. Zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví osob a zvířat

V rámci zajištění ochrany před nebezpečným dotykem neživých částí v síti IT je nutné mimo jiné dodržovat zejména maximální povolené hodnoty odporu stromových zemnění. Každý stromový zemník v síti musí mít odpor menší nebo roven hodnotě, která je stanovena normou PNE 33 0000 4 a jí nadřazenými předpisy. Výpočet je založen na principu ohmova zákona, kde pomocí dovoleného dotykového napětí, proudu protékajícího místem zemního spojení a součinitele technického provedení daného zemniče zjistíme zmíněnou maximální dovolenou hodnotu odporu zemniče, viz níže [21]:

$$R_{\max} \leq k \cdot \frac{U_{tp}}{I_E} \quad [\Omega; -; V; A] \quad (2.15)$$

Norma PNE 33 0000 1 definuje dvě základní hodnoty dovoleného dotykového napětí U_{tp} . V místech sítě, u kterých jsou hřiště, plavecké bazény, kempy, rekreační plochy a podobná místa, kde se mohou shromažďovat lidé s bosýma nohama, platí maximální hodnota dovoleného napětí [5]:

$$U_{tp} = 75 \text{ V} \quad (2.16)$$

V místech sítě ve městech, obcích, v místech zastavěných nedaleko měst a obcí – místa, kde lze rozumně předpokládat, že lidé jsou obuti, platí maximální hodnota dovoleného napětí [5]:

$$U_{tp} = 150 \text{ V} \quad (2.17)$$

Značný vliv na konečnou maximální dovolenou hodnotu odporu zemniče R_{\max} má technické provedení zemniče. Norma PNE 33 0000 1 definuje pro jednotlivé typy zemničů příslušné konstanty dle tabulky níže:

Tabulka 3 - Přehled konstant jednotlivých typů zemničů [5]

Tyčový zemnič	$k=1,5$
Páskový zemnič - paprskový	$k=2$
Páskový zemnič - obvodový	$k=3$
Dvojitě ekvipotenciální kruhy	$k=5$
Trojitě ekvipotenciální kruhy	$k=7,5$

Hodnota proudu I_E je založena na znalosti kapacitního proudu sítě I_C . Tento proud je v praxi odečten z automatiky ladění tlumivky. Její výpočet je řešen podle normy PNE 33 0000 4 následovně a jedná se o maximální předpokládaný zbytkový proud zemního spojení při naladění tlumivky na danou kapacitu sítě. Vzniká z nepřesností v nastavení tlumivky, činnou složkou způsobenou svody na vedení a činným odporem zhášecí tlumivky. Koeficient „r“ reprezentuje tabulkovou hodnotu redukčního činitele. Pro zjednodušení lze uvažovat s hodnotou $r = 1$ [21]:

$$I_E = r \cdot 0,1 \cdot I_C \quad [A; -] \quad (2.18)$$

Z výše zmíněného je vlastní podstata kompenzace zemních kapacitních proudů zřejmá. Vhodně zvolenou kompenzací sítě tedy dosáhneme vhodnějších podmínek při dimenzování daného zemniče. „Čím menšího proudu I_E v praxi dosáhneme, tím vyšší je normou přípustná hranice maximálního odporu zemniče.“

3. Možnosti lokalizace a vymezení místa zemního spojení

Provozování sítí IT, s uzlem ať už uzemněným přes zhášecí tlumivku, rezistor či zcela izolovaným od zemního potenciálu, s sebou nese nejen provozní výhody, ale také nevýhody oproti sítím s pevně uzemněným uzlem sítě. U sítí TT dochází při první poruše ihned k jednofázovému či vícefázovému zkratu – neexistuje zde pojem „zemní spojení“. Tento jev je ale výhodný z pohledu okamžité reakce ochrany vybavením. V reálných situacích se setkáváme s uměle vytvořeným zpožděním ochrany. Můžeme tedy říci, že selektivita ochrany je zde vymezena nejen velikostí vypínacího proudu, ale také časem trvání. Toto zpoždění je zde z důvodu eliminace vypínání vedení z důvodu mžikových nadproudů vzniklých v síti. Obecně jsou v sítích pro podobné účely využívány automatiky opětovného zapnutí. Pokud dojde v síti s aktivní automatikou opětovného zapnutí k jevu, na který zareaguje ochrana vybavením, pak provede automatika opětovné zapnutí vedení pod napětí. Pokud i na toto zapnutí zareaguje ochrana vybavením, automatika opětovného zapnutí vyhodnotí jev za poruchový a již vedení automaticky nezapíná. Budování sítí IT je výhodné zejména z důvodu možnosti vzniku zemních spojení. Můžeme určitě říci, že venkovní síť VN, s ochranným pásmem 7 m (Zákon č. 458/2000 Sb. – Energetický zákon), budou v lesním průseku vzhledem k poloze vodičů a výšce stromů mnohonásobně náchylnější k provozním poruchám než např. vedení VVN 110 kV. Důvodem je zejména větší rozsah ochranného pásma (12 m) a vyšší uložení vodičů. U sítí IT, kde existuje pojem „zemní spojení“, lze vedení provozovat i za předpokladu jeho výskytu. Teprve při výskytu mezifázového zkratu dochází k „tvrdému“ zkratu a vedení již provozovat nelze. Je tedy žádoucí, aby bylo zemní spojení co nejrychleji a nejefektivněji dohledáno a odstraněno. Tím je opět obnovena plná funkčnost elektrického zařízení.

Paprsková venkovní a kabelová vedení VN v napájecích stanicích distribučních sítí se podle normy ČSN 33 3051 chrání nadproudovou zkratovou časově nezávislou ochranou, popřípadě i nadproudovou ochranou mžikovou. U vedení provozovaných jako „kruhovatelná“ norma předpokládá nadproudovou směrovou časově nezávislou ochranu. [12]

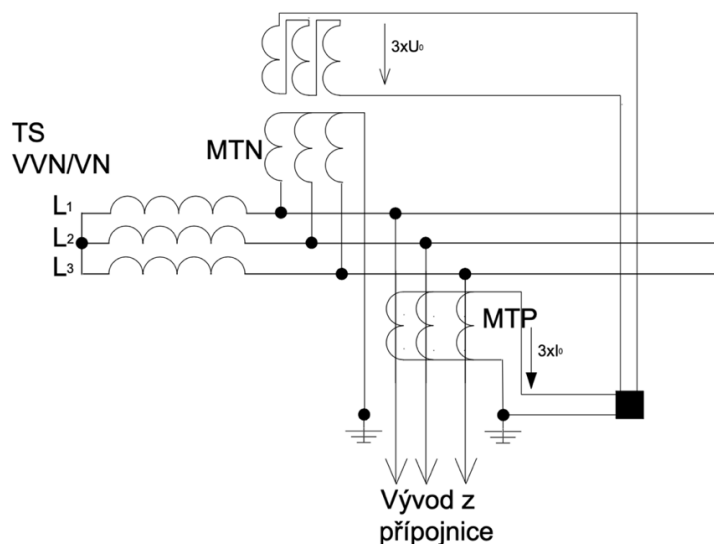
Závažný problém ovlivňující rychlost obnovení plné funkce vedení při zemním spojení je identifikace postiženého vývodu, určení postiženého úseku vedení a nalezení konkrétního místa zemního spojení. U zemních spojení v sítích s kompenzací zemních kapacitních proudů se sice připouští provoz se zemním spojením do doby zjištění místa poruchy, ten však přináší jak možné ohrožení osob v okolí poruchy, tak i nebezpečí přechodu zemního spojení ve zkrat nebo vícenásobnou poruchu. [12]

3.1. Zjištění postiženého vývodu

3.1.1. Měření netočivé složky proudu a napětí

Metody detekce zemních poruch jsou typicky založené na měření netočivých složek napětí a proudu. Tyto složky jsou měřeny v napájecích rozvodnách, kde na každém vývodu je měřena netočivá složka proudu a netočivá složka napětí na přípojnících napájecí rozvodny. Netočivá složka proudu je nejčastěji měřena s využitím součtového zapojení tří přístrojových transformátorů proudu PTP, díky čemuž je ve skutečnosti měřen trojnásobek netočivé složky proudu $3I_0$, jak ukazuje obrázek 27. Netočivá složka napětí je nejčastěji měřena podobně, a to s využitím tří měřicích (přístrojových) napěťových transformátorů PTN, přičemž je rovněž měřen trojnásobek netočivé složky napětí $3U_0$. V případě, že je napájecí rozvodna vybavena zhášecí tlumivkou (kompenzovaná soustava) je netočivá složka napětí měřena automatickou přímo mezi uzlem napájecího transformátoru a zemnicí soustavou (uzlové napětí). [13]

V symetrické soustavě bez zemního spojení jsou pak netočivé složky proudu i napětí rovny nule. V praxi ovšem ochrany pracují s určitým rozladěním sítě a reagují tedy na netočivou složku větší, než je nastavená hodnota.



Obrázek 27 – Zapojení měření netočivé složky proudu a napětí v napájecí rozvodně VVN/VN

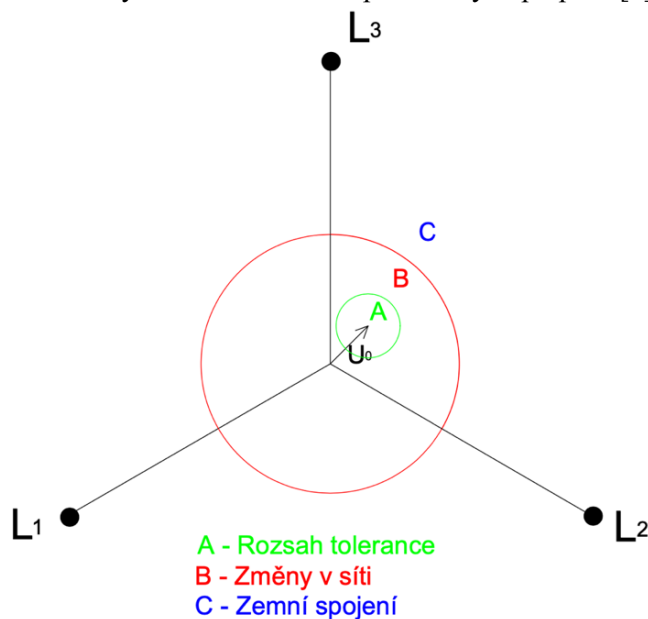
Jak je již popsáno výše, použití této metody v napájecí rozvodně na jednotlivých vývodech dokáže efektivně určit vývod, na kterém se nachází zemní spojení. Ovšem přesné místo lokalizovat pouze touto metodou nelze. Jedná se pouze o detekování existujícího zemního spojení. Novější typy ochrany jsou rozšířeny o funkcionality detekce a lokalizace.

3.1.2. Švédská neutrála

Švédská neutrála není ani tak metodou, nýbrž systémem. Tento systém v sobě sdružuje funkci indikace zemního spojení, kompenzaci zbytkového proudu a určení místa zemního spojení v síti. Systém je schopen na základě indikace konkrétního zemního spojení automaticky kompenzovat zbytkový proud. Velkou výhodou tohoto systému je skutečnost, že se dokáže „adaptovat“ na změny rozsahu sítě. Pokud tedy dojde k provozní manipulaci a odpojení/připojení části sítě k dotčenému VN napájecí, jehož uzel je izolován od země přes zmíněný systém, pak dojde k naladění systému na novou hodnotu kapacity sítě. [7]

U kapacitně souměrné sítě dochází v případech kovového zemního spojení, kdy $R_p = 0$, k zvýšení uzlového napětí na hodnotu fázového napětí postižené fáze. Pokud ovšem v takové síti dojde k vzniku odporového zemního spojení, pak je napětí uzlu proti zemi vždy menší, než je tomu u zemního spojení kovového. V případě použití této metody jsme tedy schopni efektivně pracovat s kovovými zemními spojeními. Obecně platí, že čím větší je přechodový odpor zemního spojení R_p , tím se tato metoda stává méně a méně spolehlivou.

Kompenzace zbytkového proudu umožňuje provozovat postižený vývod bez nutnosti jeho vypnutí. RCC (Residual Current Compensation) systém „chrání“ postižené kabely před proražením a eliminuje poškození dalších vývodů během trvání přechodných přepětí. [7]



Obrázek 28 – Příklad principu pásem napětí uzlu u švédské neutrály [7]⁸

Poloha, směr a velikost fázoru napětí uzlu U_0 jsou určeny hodnotami nesymetrie, tlumení a rozladění sítě přímo v daný okamžik. Pokud se jedná o stav bezporuchový, pak se napětí uzlu pohybuje v oblasti kružnice A. Ve stavech sítě, kdy dochází k manipulacím a změnám zapojení se uzlové napětí dostává mimo pásmo A, do pásma B. Při vzniku zemního spojení v síti, se fázor uzlového napětí přesouvá do oblasti C – ta indikuje výskyt zemního spojení.

⁸ Poloha oblasti A (rozsah tolerance), je zde čistě jako příklad – skutečná poloha se může lišit

Netočivá admitance je pak pro jednotlivé body vypočítána jako podíl součtového proudu I_0 a napětí U_0 . Fyzikálně reprezentují změřené netočivé admitance kapacitu vývodů proti zemi. Tyto hodnoty jsou pro všechny nepostižené vývody také při zemních spojeních neměnitelné. Vedle netočivých admitancí vývodů se zjišťuje odpovídající hodnota kompenzační tlumivky a porovnává se s jejím proudovým nastavením. Pokud je to nezbytné, tlumivka se přemístí na správnou hodnotu a kompenzátor se odpojí. Aktuální hodnota U_0 se pak používá jako nová referenční hodnota pro další kontrolu sítě. [7]

3.1.2.1. Provoz se zemním spojením metodou švédské neutrály

Při napětí U_0 v pásnu C se zapíná automatika na provoz se zemním spojením. Nejdříve se změní a vypočtou netočivé admitance a zjistí se postižený vývod. Kompenzátor zbytkového proudu reguluje U_0 až netočivá admitance postiženého vedení dosáhne výchozí hodnoty při bezporuchovém stavu. Po tomto regulačním průběhu je poruchové místo prakticky bez proudu a napětí. Aby se zjistilo, zda zemní spojení trvá, je kompenzátor na předem definovanou dobu vypnut a pak znovu zapnut. Jestli se porucha objeví, vrátí se systém do normální činnosti. Měření zbytkového proudu je rozhodující pro dokonalou kompenzaci zemního spojení. [7]

3.1.2.2. Určení místa zemního spojení metodou švédské neutrály

Při provozu s RCC jednotkou se zemním spojením se signalizuje postižený vývod na signalizační panel, případně přes odpovídající výstupní relé na nadřazený signalizační systém. Místo tradičního vyhledávání místa poruchy je možno přesněji určit polohu přímo. Funkce určení polohy předpokládá, že postižený vývod je možno spojit s druhým bezporuchovým vývodem do uzavřené smyčky. [7]

3.1.3. Měření jalových nebo činných „nulových“ výkonů

Použití u zemních jalových nebo činných směrových ochran. Dřívější praxe v kompenzovaných sítích VN doporučovala nastavení směrových ochran na činnou složku netočivého proudu, která se nedá vykompenzovat a teče „z místa zemního spojení směrem do vedení“. Pro zajištění jejich správné činnosti se někdy používá krátkodobé připojení odporu na sekundární vinutí tlumivky při vzniku netočivé složky napětí cca $U_0 > 30\text{V}$. Pokud jde o síť s kapacitním proudem do 5 A, které se provozují jako izolované, je nutné v případě užití směrových ochran použít směrových ochran na principu vyhodnocení jalového výkonu. U sítí VN s kompenzací a přechodovým odporovým uzemněním uzlu dochází vlivem připojení činného odporu obvykle k výraznějšímu zvýšení činného výkonu P_0 (až 4x), než bez připojení činného odporu. Tento způsob je spolehlivý pro kovové zemní spojení a pro nízko-odporové zemní spojení (vodič spadený na konzolu). Pro vysoko-ohmové zemní spojení (vodič ve stromoví), kde se hodnoty napětí U_0 pohybují kolem 10 V, tyto ochrany většinou nepůsobí. [7]

3.2. Identifikace konkrétního úseku a místa zemního spojení

3.2.1. Metoda měření směru toku netočivé složky proudu

Pokud bychom vycházeli z předpokladu nainstalovaného měření směru toku netočivé složky proudu (viz 3.1.1) na všech úsekových spínačích sítě pak dokážeme zjistit, mezi kterými úsekovými spínači se zemní spojení vyskytuje. Princip je pak podobný identifikaci postiženého vývodu. Tedy pokud netočivá složka proudu „teče“ směrem od rozvodny, je místo zemního spojení ve směru od rozvodny, tedy ve směru toku netočivé složky proudu. Tak lze vymezit úsek s poruchou na vzdálenost dvou sousedních úsekových spínačů. Pokud by bylo měření nainstalováno na každém stožáru, bylo by možno určit přímo pole vedení, kde je porucha. Tento systém je funkční a pro praxi naprosto vyhovující. Problém je právě v ceně výše uvedených dálkových měřících přístrojů a v ceně jejich instalace. Při velkém rozsahu těchto sítí na území ČR je nasazení tohoto systému neefektivní. [7]

3.2.2. Metoda vymezení úseku zemního spojení pomocí manipulací

Za manipulaci s prvky zařízení při uvolňování zařízení elektrizační soustavy z provozu a jeho uvádění do provozu se považují činnosti, jimiž se mění okamžitý stav zapojení zařízení prostřednictvím vypínačů, odpínačů, odpojovačů a uzemňovačů s výjimkou úkonů vyvolaných působením síťových automatik. Za manipulaci se považuje i regulace napětí, vypnutí a zapnutí automatik opětného zapnutí a automatických záskoků. [17]

Významnou metodou, používanou při vyhledávání úseku zemního spojení na vedení, jsou postupné manipulace. Dispečer postupně pomocí dálkově ovládaných manipulačních prvků sítě provádí prvotní vymanipulování postiženého úseku. Tato metoda vyžaduje zkušenost daného dispečera a schopnost jeho orientace v dispečerském řídicím systému. Tím, že dispečer opakovaně připíná a rozepíná různé úseky vedení dochází jednak ke změně normálového zapojení sítě, ale hlavně k neustále se měnící hodnotě kapacity sítě. Na tento stav musí reagovat zhášecí automatika ladění zhášecí tlumivky (pokud není její funkce během vymezování poruchového úseku záměrně odstavena). Po zmenšení potenciálního úseku místa zemního spojení vyrazí na místo zástupce provozovatele, který dle pokynů dispečera vymezí úsek pomocí místně ovládaných prvků sítě. Přesné místo zemního spojení následně dohledává pochůzkou vymezeným úsekem vedení.

3.2.3. Indikace postižených úseků kabelů VN

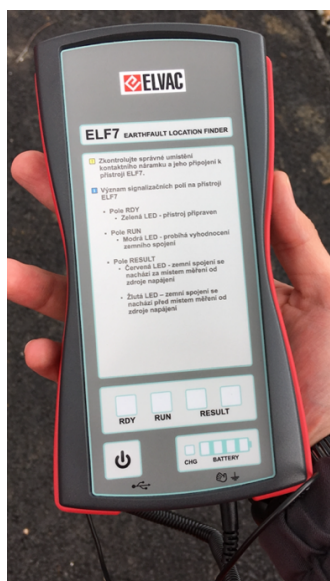
Pro kabelové sítě VN jsou užívány indikátory průchodu zemních proudů, které u paprskově provozovaných kabelových sítí umožňují určit úsek se zemním spojením. Indikace je možná v těch případech, kdy místem zemního spojení protéká dostatečně velký proud. Původní řešení využívalo k jednoduchému měření netočivé složky proudu kabelů s olověným pláštěm proudový transformátor v uzemnění kabelových plášťů. Nyní je využíván speciální snímač zemních proudů pro použití u všech druhů kabelů. [12]

3.2.4. Metody přesného místního dohledávání zemního spojení pomocí ručních přístrojů

Dnes existují ruční přenosné měřicí přístroje, které jsou schopny na základě detekce změny činné složky proudu zemního spojení určit jeho relativní polohu. Tato technologie nachází svoje využití právě ve fázi, kdy je na postižený úsek vedení vyslán zástupce provozovatele. Dispečer tedy již provedl základní vymanipulování postiženého úseku vedení pomocí dálkově ovládaných manipulačních prvků sítě. Pokud se přístroj nachází pod postiženým vedením ve chvíli, kdy dojde v rozvodně k automatickému připojení sekundárního odporníku, pak přístroj reaguje zprávou: „Zemní spojení se nachází za/před místem měření, od místa napájení“ (myšleno galvanickou cestou). Tímto způsobem a správným použitím přístroje jak ze strany obsluhy, tak i dispečera dochází ke zefektivnění konečného dohledávání místa zemního spojení – to v praxi trvá nejdéle.

Tento princip byl zkoušen při umělých zemních spojeních v JČE v letech 1984. Metoda se tehdy ukázala jako účinná v případech, kdy není za místem měření od zdroje napájení připojena významná kapacita, např. rozsáhlá kabelová síť. V současné době je využívána novější verze této technologie. Byl zde odstraněn nedostatek ohledně měření v místě před velkou kapacitou, jak zmiňuji výše. Tato technologie je schopna určit zemní spojení s přechodovým odporem o hodnotě 0 - 1,2 k Ω .

Tuto technologii jsme si ve společnosti E.ON Distribuce, a.s. měli možnost vyzkoušet a nyní probíhá její pilotní provoz. Již při prvotních testování při uměle vytvořených zemních spojeních (kovových) byla zaznamenána 100% úspěšnost správného vyhodnocení. Pro korektní zavedení do provozu jsme společně s kolektivem zpracovatelů vytvořili místní provozní a bezpečnostní předpis – ECD-PP-282 – MPBP pro identifikaci místa zemního spojení pomocí ELF7. Tento MPBP stanoví pravidla pro identifikaci místa ZS na nadzemním vedení DS 22 kV (holém a izolovaném) pomocí ELF7 a je zpracován na základě norem ČSN EN 50 110 1 a PNE 33 0000 6, viz Příloha 1.



Obrázek 29 – ELVAC ELF7 (Ruční přístroj pro lokalizaci místa zemního spojení) [18]

4. Příklad výpočtu kompenzace zemního spojení

4.1. Teoretický rozbor

V této části úlohy znázorním postup pro výpočet charakteristických veličin při zemním spojení v síti IT - 22 kV. Uvažuji zde symetrickou síť, tedy každý vodič má stejné parametry R , L , C . Tato část slouží pouze jako ukázka výpočtu. Počítaná síť není posuzována z ostatních technických pohledů. Při projektování sítě nebylo uvažováno se zatížením, selektivitou, jištěním, logickým topologickým uspořádáním aj. Síť slouží pouze jako „zdroj“ kapacitního proudu, na který budu navrhovat kompenzační tlumivku.

4.2. Uvažované parametry

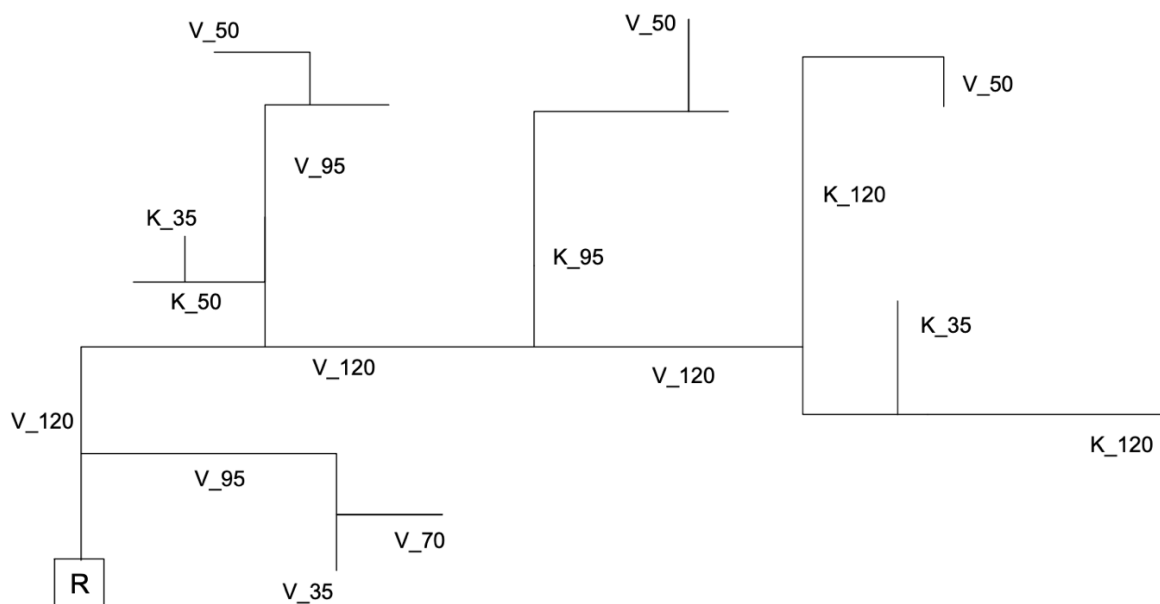
Uzel sítě uvažuji v kontextu této práce za uzemněný přes kompenzační tlumivku. Samotný výpočet proudu, který prochází místem zemního spojení, je založen na velikosti kapacitního proudu, který je vedení schopno dodat. Zároveň nezáleží na tom, v jakém místě sítě by k zemnímu spojení došlo.

Nejprve si definuji rozsah sítě. Následně výpočtu potřebné parametry a s ohledem na tyto navrhnu vhodnou tlumivku pro kompenzaci zemního spojení. V případě kabelového vedení pracuji s tabulkovými hodnotami odporů, indukčností a kapacit, viz [11]. Zbylé dopočítám.

Hodnoty veličin pro venkovní vedení počítám v technickém provedení konzol typu „pařát“ – uspořádání lan ve tvaru rovnostranného trojúhelníku a dle vztahů (1.1), (1.3) a (1.7) s následujícími konstantami:

- | | |
|--------------------------------------------|-----------------------|
| - Střední vzdálenost vodičů: | $a_s = 1,6 \text{ m}$ |
| - Vzdálenost vodičů od zrcadlových obrazů: | $D_s = 10 \text{ m}$ |
| - Střední výška vodičů nad zemí: | $m = 9,976 \text{ m}$ |

4.3. Výpočet



Obrázek 30 - Pravoúhlé schématické znázornění počítané sítě ⁹

Tabulka 4 - Soupis úseků vedení podle způsobu provedení a dle použitého průřezu

Typ vedení	Průřez vodiče [mm ²]
Venkovní AlFe 6	120
Venkovní AlFe 6	120
Venkovní AlFe 6	120
Venkovní AlFe 6	95
Venkovní AlFe 6	95
Venkovní AlFe 6	70
Venkovní AlFe 6	50
Venkovní AlFe 6	50
Venkovní AlFe 6	50
Venkovní AlFe 6	35
Kabelové AXEKVCEY	120
Kabelové AXEKVCEY	120
Kabelové AXEKVCEY	95
Kabelové AXEKVCEY	50
Kabelové AXEKVCEY	35
Kabelové AXEKVCEY	35

⁹ V=Venkovní_AlFe_6 K=Kabelové_AXEKVCEY

Tabulka 5 - Tabulka zvoleného rozsahu vedení a vypočtených hodnot parametrů vedení

Typ vedení	Průřez vodiče [mm ²]	Poloměr vodiče [m]	Délka úseku [km]	Parametry vedení v daných úsecích sítě ¹⁰					
				Činný odpor R [Ω]	Indukčnost L [mH]	Kapacita C [μF]	Induktivní reaktance X_L [Ω]	Kapacitní reaktance X_C [Ω]	Kapacitní susceptance B_C [μS]
Venkovní AlFe 6	120	0,00618	9,5	2,217	10,595	0,085	3,329	37564	26,621
Venkovní AlFe 6	120	0,00618	13	3,033	14,480	0,116	4,549	27451	36,429
Venkovní AlFe 6	120	0,00618	11	2,567	12,260	0,098	3,852	32442	30,824
Venkovní AlFe 6	95	0,00550	10,2	3,006	11,610	0,089	3,647	35640	28,058
Venkovní AlFe 6	95	0,00550	4,6	1,356	5,263	0,040	1,654	79029	12,654
Venkovní AlFe 6	70	0,00472	3	1,200	3,542	0,026	1,113	124085	8,059
Venkovní AlFe 6	50	0,00399	2,3	1,288	2,804	0,019	0,881	166028	6,023
Venkovní AlFe 6	50	0,00399	2,2	1,232	2,684	0,018	0,843	173575	5,761
Venkovní AlFe 6	50	0,00399	3,1	1,736	3,762	0,026	1,182	123182	8,118
Venkovní AlFe 6	35	0,00334	0,8	0,640	1,036	0,006	0,326	490065	2,041
Kabelové AXEKVCEY	120	0,00618	7	1,771	4,340	1,680	1,363	1895	527,788
Kabelové AXEKVCEY	120	0,00618	6,3	1,594	3,906	1,512	1,227	2105	475,009
Kabelové AXEKVCEY	95	0,00550	4,8	1,536	3,072	1,056	0,965	3014	331,752
Kabelové AXEKVCEY	50	0,00399	4,4	2,820	2,992	0,792	0,940	4019	248,814
Kabelové AXEKVCEY	35	0,00334	3,1	2,691	2,170	0,496	0,682	6418	155,823
Kabelové AXEKVCEY	35	0,00334	1,1	0,955	0,770	0,176	0,242	18086	55,292
Celkem			86,4	29,642	85,289	6,236	26,794	1324598	1959,066

¹⁰ Všechny výpočty jsem provedl v programu Excel dle vztahů uvedených v kapitole 1.1. této práce

4.4. Návrh kompenzační tlumivky

Jak již bylo v průběhu této práce zmíněno, zhášecí tlumivka je vhodné technické řešení pro izolované sítě do 400 A kapacitního proudu. Poté je nutné použití odporu. Proto je v první řadě nutné ověřit, zda počítaná síť vyhovuje podmínce:

$$I_C < 400 \text{ A} \quad (4.1)$$

$$I_C = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot B_C = \sqrt{3} \cdot 22000 \cdot 1959,066 \cdot 10^{-6} = 74,65 \text{ A} \quad (4.2)$$

nebo:

$$I_C = \omega \cdot U_f \cdot 3C = \omega \cdot 12701 \cdot 3 \cdot 6,236 \cdot 10^{-6} = 74,65 \text{ A} [19] \quad (4.3)$$

Podmínka na maximální povolený kapacitní proud sítě pro použití kompenzační tlumivky je splněna, tudíž mohou pokračovat ve výpočtech indukčnosti a výkonu.

$$74,65 \text{ A} < 400 \text{ A} \quad (4.4)$$

4.4.1. Indukčnost kompenzační tlumivky

Pro výpočet indukčnosti kompenzační tlumivky použijeme již zmíněnou rovnici:

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot 6,236 \cdot 10^{-6}} = 0,54159 \text{ H} \quad (4.5)$$

4.4.2. Jalový výkon kompenzační tlumivky

$$Q_L = \frac{U_s^2}{3 \cdot \omega \cdot L} = \frac{22000^2}{3 \cdot \omega \cdot 0,54159} = 984,208 \text{ kvar} \quad (4.6)$$

4.4.3. Návrh výkonu kompenzační tlumivky

Pomocí dílčích výpočtů jsem dostal konečnou hodnotu 984 kvar pro výkon kompenzační tlumivky. K tomuto potřebnému kompenzačnímu výkonu dále připočtu 30%, abych zohlednil možný budoucí rozvoj vedením zásobované oblasti. Tímto se dostávám na hodnotu 1279 kvar. Volím nejbližší vyšší hodnotu z tabulky níže, tedy 1700 kVA (typ ASR 1.6).

Tabulka 6 - Jmenovité výkonové řady tlumivek – spol. EGE, s.r.o. [20]

Power*] Leistung*] [max] kVA	Type Typ	typical dimensions Abmessungen (informative)			Weight Gewicht [max] kg
		A [height] A [Höhe]	B [width] B [Breite]	C [length] C [Tiefe]	
200	ASR 0.16	1650	1460	1171	990
500	ASR 0.5	1970	1990	1350	1790
630	ASR 0.63	2220	2160	1220	1900
1000	ASR 1.0	2400	1820	1330	2900
1700	ASR 1.6	2510	1810	1492	3800
2100	ASR 2.0	2630	2495	1505	4400
2550	ASR 2.5	2730	2315	1930	4900
4000	ASR 3.2	3015	2420	2130	6000
4300	ASR 4.0	3080	1840	2460	6500
5000	ASR 5.0	3650	2680	1820	8500
7300	ASR 6.3	3810	2550	2310	10400
8000	ASR 8.0	3875	2694	2363	12600
10500	ASR 10	4440	2694	2363	15200

Závěr

Výsledkem této práce je shrnutí základních informací o popisu elektrizační soustavy, kabelových a venkovních sítí, způsobu provedení uzlů sítí a také rozborů vzniku zemních spojení s možností jejich kompenzace a následné lokalizace. Mimo teoretické informace jsem uvedl i příklady z praktického řešení zemních spojení. Téma jsem se snažil popsat z různých pohledů. Z rozboru vývoje kapacitních proudů v distribuční soustavě lze vypořádat zcela jasný trend. Potřeba kompenzačního výkonu distribučních soustav bude jistě narůstat i nadále. Při návrhu modelu sítě v kapitole 4 jsem záměrně zvolil smíšenou síť slučující jak kabelové, tak venkovní vedení. Značně se projevují vlastnosti kabelového vedení, se kterým byla síť modelována. Hodnoty kapacity kabelových úseků výrazně převyšují kapacity venkovních úseků a tím tvoří majoritní podíl na celkové kapacitě modelované sítě. Pro tuto síť jsem následně navrhl kompenzační tlumivku s ohledem na možný budoucí rozvoj sítě.

V případech, kdy jsou popisovány různé způsoby a metody lokalizace místa zemního spojení je veškerá pozornost věnována automatikám, vyhodnocujícím programům a spíše zařízení sekundární techniky (myšleno z pohledu distribuční soustavy). Je velice důležité si uvědomit, že úspěšné dohledání místa zemního spojení záleží také na kvalitě a zkušené obsluze, která je schopna tato data a výstupy korektně vyhodnotit s ohledem na aktuální situaci sítě. Ovšem i tato obsluha vyhodnocující data v řídicím systému je svým způsobem omezena pouze na to, jaká data jí systém poskytne. Klíčovým článkem celého řetězce je spolupráce s pracovníkem, který je fyzicky přítomen v terénu. Teprve potom, co všechny články tohoto řetězce spolupracují, lze zemní spojení efektivně dohledat. „Efektivně“ je zde míněno vyhledání zemního spojení v co nejkratším čase za použití minimálního počtu manipulací v síti. Jako velice zajímavou bych chtěl vyzdvihnout právě onu metodu přesného místního dohledávání zemního spojení pomocí ručních přístrojů. Tato metoda totiž nejlépe reprezentuje bezpodmínečně nutnou spolupráci mezi pracovníkem vyhodnocujícím data řídicího systému a pracovníkem v terénu.

Problematika spojená se zemním spojením je v současné době řešena zejména v oblastech větších energetik a provozovatelů elektrických zařízení. V jejich zájmu je udržovat síť v řádném a bezvadném stavu. Zemní spojení jsou svým charakterem posuzována jakožto jev, který běžně nastává. V případě jeho vzniku pak záleží jen na provozovateli, jak se v rámci regulovaných standardů pro obnovení dodávky elektrické energie postaví k jeho dohledání a odstranění. Energetická situace byla, je a bude vždy žhavým politickým a technickým tématem. Z důvodu neustále se zpřísnujících standardů kvality, spolehlivosti a rychlosti obnovení dodávek elektřiny musí energetiky reagovat tomu úměrným technickým rozvojem a investicemi do nových technologií. Za posledních 20 let došlo k natolik markantnímu vývoji technologií, že na něj energetika nebyla schopna vždy kompletně reagovat. Energetická zařízení pro přenos a distribuci jsou budována s vidinou maximalizace udržitelnosti a využitelnosti. Osobně si myslím, že na vlnu „kompletní digitalizace“ a inovativních technologií nejsou někdy schopny reagovat ani menší celky provozovatelů elektrických zařízení. V případech velkých energetik, které mají technicky velkou „setrvačnost“, budou přechody na nové technické způsoby a technologie ještě několik let trvat.

Zdroje

- [1] Zákon č. 458/2000 Sb. – Energetický zákon
- [2] ČSN 33 0120 (330120) Elektrotechnické předpisy - Normalizovaná napětí IEC
- [3] ČSN 33 3070 Elektrotechnické předpisy – Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích VN
- [4] Článek E.ON Distribuce, a.s. - <https://www.eon-distribuce.cz/clanek/prenosova-distribucni-soustava-4-cast> (1.3.2020)
- [5] PNE 33 0000 1 – Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a v přenosové soustavě
- [6] Požadavky za umístění, provedení a zapojení měřicích souprav u zákazníků a malých výroben s připojovaným výkonem do 250 kW připojovaných do sítě NN, E.ON Distribuce, a.s.
- [7] Toman P. – Lokalizace místa zemního spojení v sítích VN, Brno, 2002
- [8] Orságová J. – Elektrické stanice a vedení, Brno, 2013
- [9] Trojánek Z. – Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNLT, 1987
- [10] Kouba D. – Analýza bezpečného provozu kompenzované sítě VN velkého rozsahu, Plzeň, 2013, Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [11] Krejčí P. – Cvičení z elektroenergetiky (Gurecký, Rusek), Ostrava, 2003
- [12] Procházka K. – Vybrané problémy provozu distribučních sítí VN, České Budějovice, 1992
- [13] Toman P., Mišák S., Drápela J., Orságová J., Paar M., Topolánek D. a kol. – Provoz distribučních soustav (VUT Praha), Praha, 2011
- [14] Procházka K., Jinderle P. a kol. – Zemní spojení na neuzemněném betonovém stožáru 22 kV. CK CIRED 2008, E.ON + EGC-CB Brno, 2008.
- [15] Obrázek řezu podzemního kabelu 22- AXEKVCEY, LINK: <https://www.eon-distribuce.cz/clanek/prenosova-distribucni-soustava-4-cast> (29.3.2020)
- [16] Obrázek venkovního vedení, LINK: <https://www.csres.cz/Upload/Prevence/rizika-pouzivani-vozidel-a-mechanismu-v-ochrannych-pasmech-elektrickych-vedeni.pdf> (29.3.2020)

[17] Vyhláška č. 79/2010 Sb. - Vyhláška o dispečerském řízení elektrizační soustavy a o předávání údajů pro dispečerské řízení

[18] Osobní galerie

[19] Gurecký J. - Skriptum PREE (VŠB-TU Ostrava)

[20] Datasheet tlumivek, spol. EGE: https://www.ege.cz/storage/1_1565_2017ege-asr-arc-suppression-coils---erdschlussloschspulen.pdf (24.3.2020)

[21] PNE 33 0000 4 Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny

Přílohy

Příloha 1: MPBP pro identifikaci místa zemního spojení pomocí přístroje ELF7 (ECD-PP-282)